

Hodnocení kvality hovoru E-modelem

Speech Quality Evaluation by E-model

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 *Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava*.

V Ostravě 7. května 2010

.....

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. května 2010

.....

Především bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Miroslavu Vozňákovi, Ph.D. za poskytnutou podporu a odborné vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat studentům doktorského studia Ing. Janu Látalovi a Ing. Filipu Řezáčovi za poskytnutou pomoc při realizaci praktické části mé bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na analýzu různých technik pro hodnocení kvality hovoru, a to především výpočetního modelu zvaného E-model. V první části této práce je uveden přehled subjektivních i objektivních metod pro ohodnocování včetně jejich hlavních zástupců a popisu jejich funkcí. V další části práce je popsán celý výpočetní cyklus E-modelu dle doporučení ITU-T G.107 včetně popisu všech jeho komponent a parametrů. Poslední část se zabývá simulováním kvality právě E-modelem a srovnáním výsledků získaných objektivní intrusivní metodou PESQ. Obsahem práce je i návrh a implementace aplikace usnadňující výpočet E-modelu a návrh korekční funkce pro srovnání hodnot získaných E-modelem a metodou PESQ. Závěrem práce jsou zhodnoceny získané výsledky a dosažené cíle.

Klíčová slova: E-model, PESQ, MOS, skalár R, kodek, tandemové zapojení.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the analysis of different technics for evaluation of speech quality, mainly on computational model called E-model. The first part of this work contains an overview of subjective and objective methods for evaluation, including their main delegates and description of their functions. The next part of this work describes whole computation cycle of E-model corresponding with ITU-T G.107 recommendation, including description of all its components and parameters. The last part is focused on simulation of quality using E-model and on comparison with results obtained by objective intrusive method called PESQ. Document also contains design and implementation of application simplifying computation of E-model and it also contains model of correction function for matching values obtained by E-model and PESQ method. Evaluation of obtained results and achieved goals can be found at the end of this work.

Keywords: E-model, PESQ, MOS, scalar R, codec, tandem connection.

Obsah

1	Úvod	7
2	Metodiky posuzování kvality řeči	9
2.1	Subjektivní metody hodnocení	9
2.2	Objektivní metody hodnocení	10
2.2.1	Intrusivní testy	11
2.2.1.1	Měření na základě časové domény	12
2.2.1.2	Měření na základě spektrální domény	12
2.2.1.3	Měření na základě smyslové domény	12
2.2.2	Neintrusivní testy	16
2.2.2.1	Přístup na základě pravděpodobnosti (priori-based) . . .	16
2.2.2.2	Přístup na základě znalosti (source-based)	17
3	E-model	19
3.1	Parametry výpočtu E-modelu	19
3.2	Výpočet E-modelu	24
3.2.1	Odstup signálu od šumu (R_o)	24
3.2.2	Faktor souběžného zhoršení (I_s)	25
3.2.3	Faktor zhoršení způsobeného zpožděním (I_d)	26
3.2.4	Faktor zhoršení způsobené zařízením (I_{e-eff})	27
3.2.5	Faktor zvýhodnění (A)	27
3.3	Přepočet hodnoty R na MOS	27
4	Experiment s tandemovým zapojením kodeků a stanovení MOS	29
4.1	Simulace užitím E-modelu	29
4.2	Ověření přístupu E-modelu ke kaskádovému zapojení kodeků	31
4.3	Měření metodou PESQ	31
4.3.1	Průběh měření metodou PESQ	32
4.4	Naměřené výsledky	34
4.4.1	Simulace užitím E-modelu	34
4.4.2	Měření metodou PESQ	36
5	Vyhodnocení získaných dat a návrh korekční funkce	39
6	Závěr	45
7	Reference	47
	Přílohy	48
A	Výchozí hodnoty parametrů E-modelu	49

B	Aplikace pro simulaci výsledků pomocí E-modelu	51
B.1	Specifikace aplikace	51
B.2	Instalace a spuštění	51
B.3	Ovládání aplikace	51
B.4	Troubleshooting	52
C	Zadání laboratorního měření	55
C.1	Schéma zapojení	55
C.2	Nastavení gateway	55
C.3	X-Lite, VMware	55
C.4	SPITFILE	56
C.5	Wireshark	57
C.6	Provedení a zachycení hovoru	57
C.7	Vyhodnocení zachyceného RTP streamu, uložení zvukového vzorku a převedení na formát wav	57
C.8	AQuA, vyhodnocení kvality zvukového vzorku	58
D	Naměřené výsledky a jejich grafické reprezentace	61
E	Naměřené hodnoty s provedenou korekcí	73

Seznam tabulek

1	Přehled rozdělení MOS stupnice dle ITU-T P.800.1 [8].	10
2	Přehled subjektivních testovacích metod.	10
3	Přehled provizorních hodnot l_e [6].	22
4	Přehled provizorních hodnot parametru A dle ITU-T G.107 [3].	27
5	Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.729.	35
6	Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.729.	37
7	Hodnoty získané polynomicou regresí včetně jejich koeficientů a odchylek.	40
8	Přehled koeficientů korekční funkce pro jednotlivé kodeky.	41
9	Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.729.	42
10	Přehled výchozích hodnot a povolených intervalů vstupních parametrů E-modelu [3].	50
11	Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.711.	62
12	Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.711 μ -law.	63
13	Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.711 A-law	64
14	Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.726.	66
15	Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.726.	67
16	Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.723.1.	69
17	Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.723.1.	70
18	Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 μ -law.	74
19	Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 A-law.	75
20	Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.726.	76
21	Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.723.1.	77

Seznam obrázků

1	Poslechová MOS stupnice dle ITU-T.	10
2	Obecná architektura intrusivního měření poslechové kvality.	11
3	Obecné blokové schéma objektivního hodnocení na základě smyslové domény.	12
4	Blokové schéma měřící metody BSD.	13
5	Blokové schéma měřící metody MBSD.	14
6	Blokové schéma měřící metody PSQM.	14
7	Blokové schéma měřící metody MNB.	15
8	Blokové schéma měřící metody PAMS.	15
9	Blokové schéma měřící metody PESQ.	16
10	Blokové schéma měřící metody dle ITU-T P.563.	17
11	Referenční model spojení pro hodnocení E-modelem.	20
12	Závislost hodnoty R na OLR [4].	20
13	Závislost hodnoty R na Ta [4].	21
14	Závislost hodnoty R na T při různém $TELR$ [4].	22
15	Závislost hodnoty R na počtu qdu [4].	23
16	Vztah mezi hodnotami R a MOS [3].	28
17	Schéma zapojení experimentálního pracoviště.	30
18	Ukázka výpočtu programem E-model v1.3 pro výchozí hodnoty všech parametrů.	30
19	Ukázka grafického výstupu programu E-model v1.3.	31
20	Ukázka aplikace SPITFILE v režimu Proxy.	32
21	Ukázka aplikace X-Lite se zaregistrovaným účtem.	33
22	Nastavení hodnot le v aplikaci E-model v1.3.	34
23	Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.729.	34
24	Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.729.	36
25	Vysvětlení parametrů korekční funkce.	41
26	Porovnání křivek získaných měřením metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.729.	43
27	Ukázka ovládacího menu aplikace.	52
28	Ukázka režimu Split pro tandemové zapojení kodeků.	52
29	Schéma zapojení měřícího pracoviště.	56
30	Zastavení zachytávání provozu v programu Wireshark.	58
31	Postup uložení RTP streamu jako zvukový vzorek v aplikaci Wireshark.	59
32	Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.711.	62
33	Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.711 μ -law.	65
34	Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.711 A-law.	65

35	Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.726.	66
36	Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.726.	68
37	Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.723.1.	69
38	Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.723.1.	71
39	Porovnání křivek získaných měřením metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 μ -law.	74
40	Porovnání křivek získaných měřením metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 A-law.	75
41	Porovnání křivek získaných měřením metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.726.	76
42	Porovnání křivek získaných měřením metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.723.1.	77

1 Úvod

Kvalita služby QoS (Quality of Service) v telekomunikačních sítích a systémech je definována jako souhrn různých prostředků ke správě, řízení a monitorování, které určují, jak bude uživatel s danou službou v její konečné fázi spokojen. Díky stále rostoucímu počtu různých telekomunikačních sítí a technologií, vstupuje QoS čím dál více do popředí, ať již při plánování sítí nových, nebo při zvyšování počtu služeb na různých technologiích již dlouhodoběji používaných. QoS má nemalou roli i při konkurenčním boji různých poskytovatelů, např. při snaze o prosazení stejné či podobné služby.

Jednou z velkých součástí QoS v telekomunikacích je posuzování kvality hlasu. Avšak tato část je právě často poskytovateli opomíjena a častěji se soustředí na zvyšování kapacit sítí, rozšiřování počtu nabízených služeb a jejich prosazení na trhu. Pod pojmem kvalita řeči si lze představit jev, kdy na jedné straně komunikačního systému stojí zdroj signálu obecně (hlasu, řeči) a na straně druhé posluchač, snažící se hlas (řeč) reprodukováný zdrojem rozpoznat a ohodnotit jeho zřetelnost.

Měření kvality řeči VQM (Voice Quality Measurement) je disciplína, která nabízí prostředky pro přidání lidské perspektivy z pohledu koncového uživatele, na rozdíl od jiných tradičních metod řízení telekomunikačních sítí. Přidání této subjektivní složky však není vždy věcí pozitivní, neboť např. můžeme dosáhnout při posuzování kvality stejného vzorku řeči různých výsledků, jelikož hodnocení silně závisí na psychickém rozpoložení posluchače a jeho soustředěnosti. Dále pak jsou tyto subjektivní metody často velmi zdlouhavé a nákladné.

Právě díky nevýhodám subjektivních metod posuzování kvality řeči (a hlavně k jejich nemožnosti nasazení v reálném čase) se zavádějí metody objektivní, které již ke svému hodnocení nevyžadují lidské posluchače. Tyto metody jsou nejčastěji založeny na matematických výpočetních modelech či algoritmech, které jsou snadno spočítatelné z testovaných vzorků hlasu [1], [10].

První část této bakalářské práce se zabývá charakteristikou způsobu hodnocení kvality hovoru a stručným přehledem zástupců jednotlivých metodik. Ve druhé části je popsán výpočetní model k posuzování kvality hovoru E-model, který již nepracuje s přenesenými vzorky řeči, ale z různých parametrů přenosové cesty a použitých hlasových kodeků dokáže vypočítat hodnotu, která je označena jako R a je dále převeditelná na výstup ostatních metod k posuzování kvality řeči v hovoru. Poslední kapitoly jsou zaměřeny na praktické části této bakalářské práce, jakými jsou simulace různých vlivů přenosu v IP telefonii pro výpočet E-Modelu a dále jejich měření pomocí metody PESQ a jejich vyhodnocení.

2 Metodiky posuzování kvality řeči

Metodik pro posuzování kvality hovoru existuje více druhů. Tyto metody je dobré rozdělit do dvou základních skupin na:

- Konverzační testy
- Poslechové testy

Z těchto skupin je také patrné rozdělení kvality na konverzační CQ (Conversational Quality) a poslechovou LQ (Listening Quality).

Konverzační testy jsou založeny na vzájemné interaktivní komunikaci dvou subjektů přes přenosový řetězec testovaného systému. Tyto testy poskytují nejrealističtější testovací prostředí, avšak jsou ze všech ostatních způsobů testování nejvíce časově náročné. Častěji doporučované jsou právě testy poslechové, které však nedosahují takové věrohodnosti jako testy konverzační, protože v některých ohledech je jejich omezení méně tvrdé [1].

Tyto testy lze dále rozdělit podle způsobu získávání ohodnocení, jak již bylo v úvodu naznačeno, na:

- Subjektivní metody,
- Objektivní metody.

Pro ohodnocení kvality řeči se využívá stupnice MOS (viz obrázek č. 1) (Mean Opinion Score) definovaná doporučením ITU-T P.800 [7]. Výstupem obou typů metod, jak subjektivních tak objektivních, je přímo hodnota MOS, nebo s mírnou modifikací stupnice dle potřeby [10], [16].

Aby nedocházelo k nedorozuměním a špatným interpretacím výsledků MOS hodnot, vydala ITU-T v roce 2003 doporučení P.800.1 [8], ve kterém se rozdělily stupnice jak pro metody subjektivní a objektivní, tak i pro druhy testů konverzační a poslechové. V tabulce č. 1 je znázorněn onen přehled, kde LQ znamená dříve zmiňované Listening Quality, CQ Conversational Quality a poslední písmeno je přiděleno dle metody měření, S - Subjective, O - Objective a E - Estimated [7], [8].

2.1 Subjektivní metody hodnocení

Jak již bylo naznačeno v úvodu, subjektivní metody k posuzování kvality řeči jsou založeny na hodnocení lidských uživatelů (posluchačů). Při testování jsou přehrávány vzorky k hodnocení dostatečného počtu subjektů (skupině osob) a jejich výsledky posléze statisticky vyhodnocovány. Subjekty mají možnost hodnotit kvalitu řeči v pěti stupních od nejhorší po nejlepší, které odpovídají MOS modelu dle ITU-T specifikace.

Nejvyužívanější zástupci subjektivních metod testování jsou tzv. ACR (Absolute Category Rating) a DCR (Degradation Category Rating). U ACR posluchači udělují jedno hodnocení každému vzorku řeči dle poslechové stupnice MOS (viz obrázek č. 1). Poté jsou hodnoty všech subjektů sečteny a zprůměrovány do výsledné hodnoty MOS (MOS-LQS) pro každý daný vzorek řeči. U DCR je posluchačům nejprve poskytnut vzorek řeči



Obrázek 1: Poslechová MOS stupnice dle ITU-T.

Metoda měření	Poslechový typ	Konverzační typ
Subjektivní	MOS-LQS	MOS-CQS
Objektivní	MOS-LQO	MOS-CQO
Odhadovaná	MOS-LQE	MOS-CQE

Tabulka 1: Přehled rozdělení MOS stupnice dle ITU-T P.800.1 [8].

”originální”, před přenosem přes testovaný telekomunikační systém a posléze vzorky testované a je na subjektech, aby vyhodnotili degradaci přeneseného hovoru vůči vzorku původnímu.

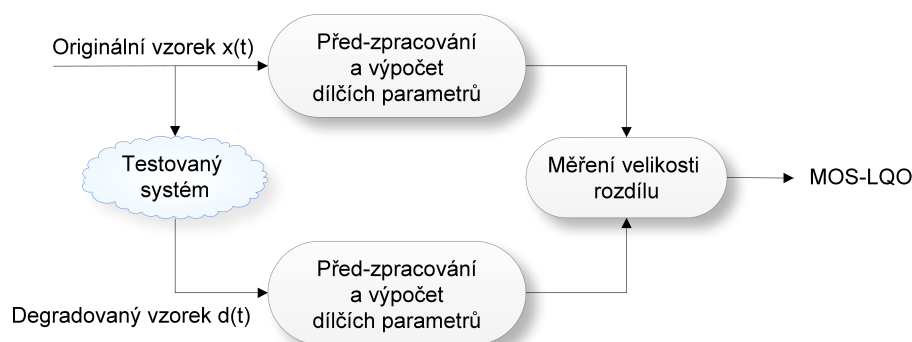
Pro provádění testů v požadovaném rozsahu a pro zajištění co možná největší objektivnosti je potřeba většího množství osob, což je z časového hlediska, a často také finančního, velmi neefektivní. Hodnocení jednotlivých subjektů je ovlivněno různými faktory, jako je psychické rozpoložení, soustředěnost, zkušenosti a mnohé další, proto lze častokrát dosáhnout různých výsledků při měření jednoho hovorového vzorku. Z tohoto důvodu je výhodnější využívat metod objektivních [7], [10].

2.2 Objektivní metody hodnocení

Použití objektivních metod pro hodnocení kvality hovoru odstraňuje nutnost použití subjektů živých využitím matematických výpočetních modelů nebo algoritmů. Jejich výstupem je opět hodnota MOS nebo podle použitého algoritmu hodnota jiná, která

Test	Typ testu
Conversational Opinion	Konverzační
Absolute Category Rating (ACR)	Poslechový
Quantal-Response Detectability	Poslechový
Degradation Category Rating (DCR)	Poslechový
Comparison Category Rating	Poslechový

Tabulka 2: Přehled subjektivních testovacích metod.



Obrázek 2: Obecná architektura intrusivního měření poslechové kvality.

je však na hodnotu MOS snadno přepočitatelná i s modifikacemi, např. podle ITU-T P.800.1. Cílem objektivních měření je co možná nejpřesněji předpovědět hodnotu MOS, která by byla získána subjektivním měřením za použití dostatečného počtu osob. Přesnost a efektivita objektivního testu je tedy dána korelací výsledku subjektivního a objektivního testu.

Objektivní metody posuzování kvality řeči se dělí do dvou skupin na:

- Intrusivní,
- Neintrusivní.

Intrusivní měření kvality je založeno na porovnání původního a degradovaného přeneseného vzorku pomocí vhodného algoritmu. Neintrusivní testy naopak používají ke svému výpočtu pouze vzorek přenesený a nemají přístup ke vzorku původnímu [1], [10].

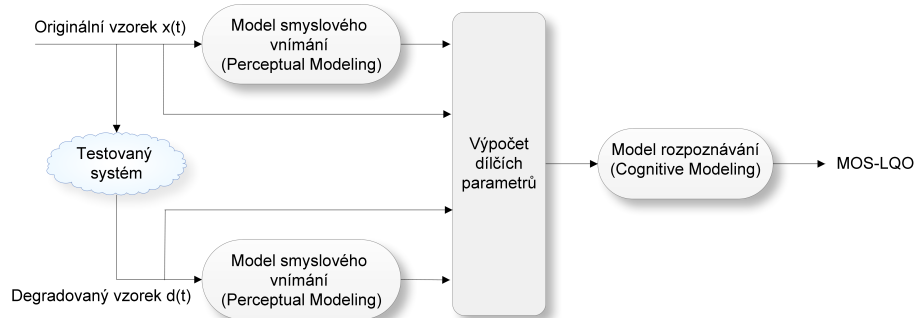
2.2.1 Intrusivní testy

Podstatou všech intrusivních (nebo také input-to-output) měření je porovnávání původního vzorku před vstupem do přenosového řetězce testovaného systému se vzorkem na výstupu testovaného systému (degradovaného vzorku). Výsledkem těchto metod je opět MOS hodnota, podle ITU-T P.800.1 označená jako MOS-LQO. Obecná architektura intrusivních měření je vyobrazena v modelu na obrázku č. 2.

První funkční blok má na starosti před-zpracování vstupujícího signálu (původního nebo degradovaného) a extrakci důležitých dat a informací z tohoto vzorku. Zde je také původní a přenesený vzorek řeči transformován do určité domény podle potřeb testování. Těmito doménami jsou:

- časová,
- spektrální,
- smyslová.

Druhý funkční blok, měření velikosti rozdílu, zahrnuje měření nesourodosti původního a přeneseného vzorku na základě zvolené domény [10].



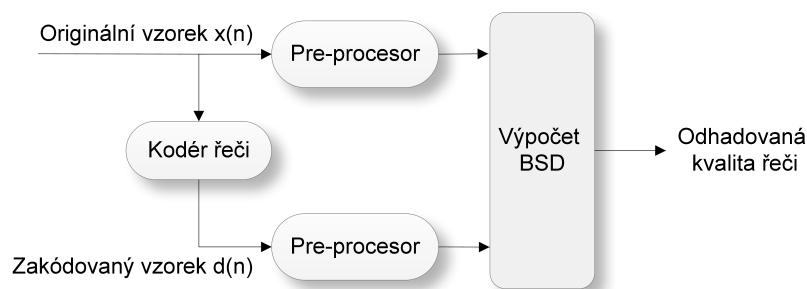
Obrázek 3: Obecné blokové schéma objektivního hodnocení na základě smyslové domény.

2.2.1.1 Měření na základě časové domény Měření na základě časové domény jsou převážně uplatňována v systémech používajících analogové kódování, nebo-li kódování průběhu a tvaru vlny vstupního signálu, kde má cílové zařízení za úkol reprodukovat přenesenou vlnu pomocí zakódovaných parametrů. Typické měřené parametry u takových testů jsou hodnoty odstupe úrovně signálu od úrovně šumu SNR (Signal to Noise Ratio). Při tomto měření je signálem myšlena užitečná informace přenášená přes komunikační médium a šumem všechny signály ostatní a signály rušící. Tvary a průběhy vln původního a přeneseného signálu jsou porovnávány přímo, tudíž zde hraje velkou a rozhodující roli časová synchronizace těchto signálů. Pokud nedosáhneme takové správné časové synchronizace, výsledky těchto testů jsou často velmi odlišné od skutečnosti [10].

2.2.1.2 Měření na základě spektrální domény Objektivní měření na základě spektrální domény jsou o něco věrohodnější než metody založené na doméně časové, neboť jsou více odolné vůči nesrovnalostem v časové synchronizaci a fázovém posuvu mezi původním a přeneseným vzorkem signálu. Tato měření jsou silně svázána s vlastnostmi použitých hlasových kodeků a modelů reprodukce hlasu. Schopnost efektivně popsat posluchačovu sluchovou reakci je limitována právě omezením řečových reprodukčních modelů [10].

2.2.1.3 Měření na základě smyslové domény Jedná se o nejrozšířenější a nejvěrohodnější objektivní metody pro měření kvality řeči. Na rozdíl od měření na základě spektrální domény nejsou závislé na použitých modelech reprodukce hlasu, ale jsou založeny na lidském sluchovém vnímání a z toho důvodu mají ve srovnání se subjektivními metodami největší potenciál a nejlepší výsledky. Při těchto měřeních je zvukový signál transformován do modelu založeného na lidských smyslech za použití konceptů psychofyzického sluchového vnímání. Takovými koncepty jsou např. kritické pásmo spektrálního rozlišení, kmitočtová selektivita, křivka vnímané hlasitosti a další. Zjednodušené blokové schéma takových měření je vyobrazeno na obrázku č. 3 [10].

V současnosti používanými a nejvíce rozšířenými zástupci jsou:

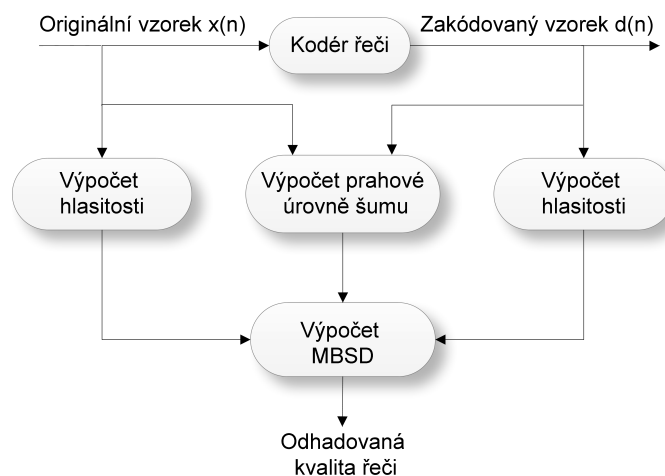


Obrázek 4: Blokové schéma měřicí metody BSD.

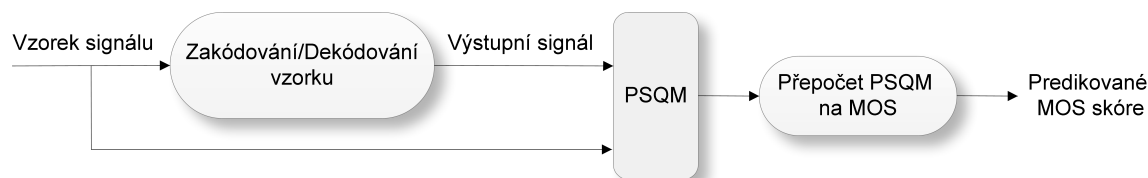
- *BSD měření (Bark Spectral Distortion)* - slouží k objektivnímu změření zkreslení na základě spočitatelných vlastností sluchového vjemu. Výsledkem BSD měření je průměr čtverce Euklidovské vzdálenosti mezi spektrálními vektory původního a zakódovaného vzorku řeči. Měření je založeno na emulování několika známých vlastností lidského ucha, jako jsou prohýbání kmitočtového spektra, změna citlivosti ucha v závislosti na změně frekvence a rozdíl mezi úrovní hlasitosti a subjektivní stupnicí hlasitosti. Zjednodušené blokové schéma měření metodou BSD je znázorněno na obrázku č. 4 [10].
- *MBSD a EMBSD měření (Modified BSD, Enhanced Modified BSD)* - MBSD je modifikace klasického BSD, ve kterém je začleněn koncept prahového krytí hluku, které se liší pro slyšitelné a neslyšitelné rušící vlivy. Používá stejné maskování hluku, jako je použito u transformačního kódování zvukových signálů. Další změnou oproti původnímu BSD je způsob výpočtu výsledné kvality vzorku, kde se porovnávají očekávané hlasitosti jednotlivých vzorků (přenesený, zakódovaný). Blokové schéma měření metodou MBSD je znázorněno na obrázku č. 5.

EMBSD je další rozšíření metody MBSD, kde byly pozměněny některé dílčí procedury, a byl zvolen nový model rozpoznávání [10].

- *PSQM (Perceptual Speech Quality Measurement)* - metoda popsaná v doporučení ITU-T P.861. Jedná se o matematický proces, který poskytuje přesné objektivní měření subjektivní kvality řeči. PSQM bylo vytvořeno pro použití a aplikaci na signály v základním telefonním pásmu (tedy 300 - 3400 Hz) s použitím kodeků a vokodérů s nízkými přenosovými rychlostmi. Při měření metodou PSQM je vzorek hlasového signálu zakódován a posléze dekodován systémy, jež testovaný přenosový řetězec využívá. Tento výsledný signál je poté časově synchronizován se vzorkem původním. Následně PSQM algoritmus porovná tyto dva signály na základě faktorů lidského vnímání, jako je citlivost na kmitočet a hlasitost. Výsledkem algoritmu je hodnota PSQM, která určuje "vnímatelnou vzdálenost" mezi původním a přeneseným vzorkem. Užitím vhodného algoritmu lze tuto hodnotu přepočítat na hodnoty dle stupnice MOS. Nevýhodou této metody je, že nedokáže úplně přesně pracovat se všemi faktory ovlivňujícími



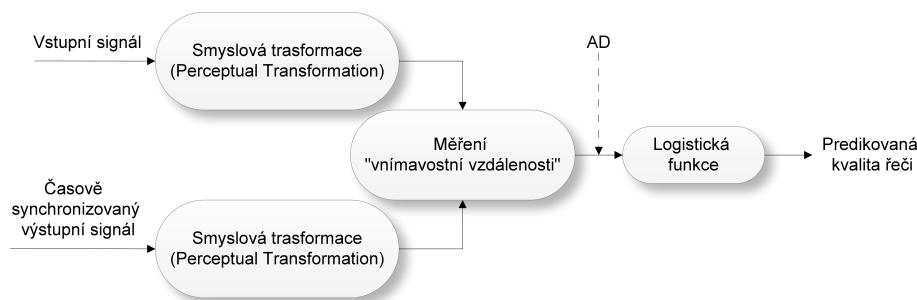
Obrázek 5: Blokové schéma měřící metody MBSD.



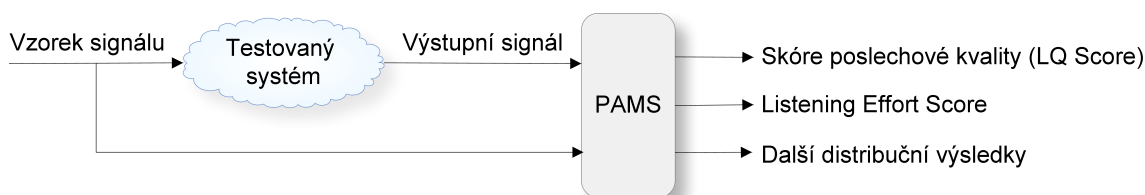
Obrázek 6: Blokové schéma měřící metody PSQM.

kvalitu řeči, jakým je např. ztrátovost (packet loss) a jiné časové poruchy. Obecné blokové schéma této měřící metody je znázorněno na obrázku č. 6 [1], [10].

- *PSQM+ (PSQM Plus)* - vychází z metody PSQM a upravuje její nedostatky týkající se časových poruch signálu a ztrátovosti. Při měření za použití metod PSQM a PSQM+ dosáhneme stejných výsledků. Ale pokud dochází k velké časové deformaci výsledného signálu nebo patrné ztrátovosti paketů, metoda PSQM+ poskytne mnohem menší hodnoty výsledku (tedy přesnější) než původní metoda PSQM [10].
- *MNB (Measuring Normalising Blocks)* - je součástí upraveného doporučení ITU-T P.861 (PSQM) z roku 1997 jako Annex II. Jde o alternativní techniku k PSQM, k měření "vnímavostní vzdálenosti" (Perceptual Distance), mezi původním a přeneseným vzorkem. Při tomto způsobu měření jsou uplatněny smyslové transformace jak na přenesený, tak také na původní zvukový signál před samotným měřením "vnímavostní vzdálenosti". Metoda MNB se dále dělí podle způsobu měření na TMNB (Time MNB) a FMNB (Frequency MNB). TMNB a FMNB jsou zkombinovány se zatěžujícími faktory, kde je výsledkem nezáporná hodnota zvaná Auditorní vzdálenost AD (Auditory Distance). Nakonec je použita logistická funkce, která dokáže převést AD hodnoty na konečnou stupnici a umožňuje korelaci se subjektivní stup-



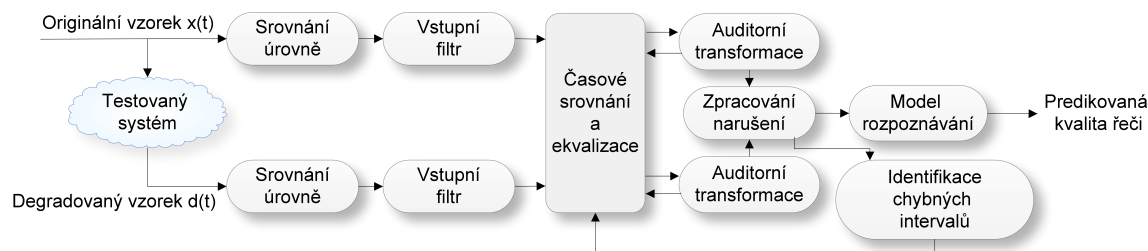
Obrázek 7: Blokové schéma měřící metody MNB.



Obrázek 8: Blokové schéma měřící metody PAMS.

nicí MOS. Blokové schéma tohoto způsobu měření je znázorněno na obrázku č. 7 [10].

- PAMS (Perceptual Analysis Measurement System)* - za vznikem této metody stojí společnost British Telecommunications. Metoda PAMS je v mnoha ohledech podobná metodě PSQM, avšak používá úplně odlišné techniky zpracování signálu a odlišné modely smyslového vnímání. Metoda PAMS ve svém výpočtu nezahrnuje efekt zpoždění, celkový zisk/útlum testovaného systému, časové a úrovněové zarovnání a ekvalizaci. PAMS porovnává původní a přenesený vzorek na základě časově-frekvenční domény. Toto porovnání je založeno na lidských smyslových faktorech, kde výsledkem je hodnota v rozmezí 1-5, která koreluje se škálou MOS hodnot. PAMS dále navíc vytváří tzv. Listening Effort Score, které koresponduje s ACR dle obou doporučení ITU-T P.800 [7] a ITU-T P.830. Blokové schéma tohoto způsobu měření je znázorněno na obrázku č. 8 [1], [10].
- PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality)* - jedná se o nejnovější objektivní testovací metodu. Je popsána v doporučení ITU-T. P.862 [9]. Metoda PESQ je primárně určena a vhodná pro stanovení kvality řeči u úzkopásmových telefonních signálů, ovlivněných následujícími stavy: užití kodeků tvarového a netvarového průběhu, transkódování, velikost vstupní úrovně signálu do kodéru, chyby přenosového kanálu, šum způsobený přenosovým systémem a krátké nebo dlouhé časové poruchy. Technika výpočtu metody PESQ kombinuje robustní techniky časového zarovnání metody PAMS a přesný model smyslového vnímání metody PSQM. Samotný výpočet lze rozdělit do několika kroků. V prvním kroku model zarovná



Obrázek 9: Blokové schéma měřící metody PESQ.

původní a degradovaný signál na stejnou konstantní výkonovou úroveň, která koresponduje s normální poslechovou úrovní používanou u testů subjektivních. Ve druhém kroku oba signály prochází vstupním filtrem, který je založen na rychlé Fourierově transformaci. V krocích dalších jsou signály časově zarovnány a "auditoriálně" transformovány (Auditory transform) podobně jako u systémů PAMS a PSQM. Auditoriální transformace u systému PESQ je založena na psychoakustickém modelu, který mapuje signály do přijímané hlasitosti v čase a frekvenci napodobováním určitých klíčových vlastností lidského ucha a odstraněním částí, které jsou nadbytečné a posluchačem neslyšitelné. Blokové schéma této měřící metody je znázorněno na obrázku č. 9 [1], [9], [10].

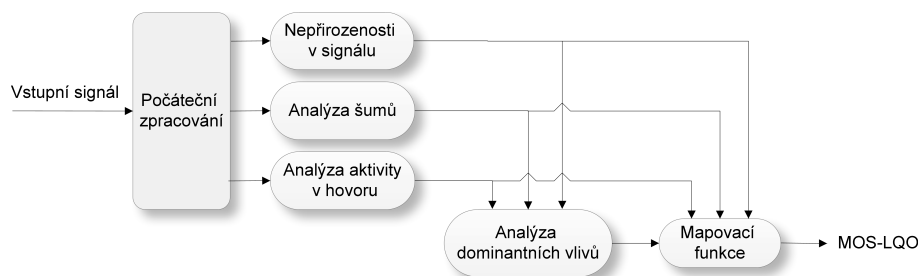
2.2.2 Neintrusivní testy

Všechny metody uvedené v kapitole 2.2.1 byly založeny na input-to-output měření, kde vyhodnocování kvality je prováděno na základě znalostí nejen vzorku přeneseného přes komunikační řetězec, ale také vzorku původního. Avšak tato měření nesou také některá svá úskalí, jako je např. nutnost precizní synchronizace při porovnávání těchto dvou vzorků nebo přímo nutnost mít k dispozici vzorek původní [1], [10].

Intrusivní metody měření kvality řeči jsou více precizní a přesné v určení výsledné kvality, ale většinou jsou pro měření v živých sítích pro nasazení v reálném čase nepoužitelné. Naopak neintrusivní objektivní metody pro měření kvality řeči potřebují ke svému výpočtu pouze vzorek přenesený, tedy degradovaný. Tyto testy mají většinou složitější výpočetní modely právě díky absenci vzorku původního. Existují dva přístupy k provádění měření užitím těchto metod:

- priori-based (založeny na pravděpodobnosti),
- source-based (založeny na znalosti).

2.2.2.1 Přístup na základě pravděpodobnosti (priori-based) Tento přístup je založen na identifikaci souboru charakteristických deformací v přeneseném vzorku a naučení statistických vazeb mezi tímto konečným souborem a subjektivními názory. Většina takovýchto měření je založena na zkoumání vizuálních vlastností spektrogramů. Tyto metody vychází z práce J. Palakala a M. J. Zorana [13], kteří navrhli metodu, jak zachytit



Obrázek 10: Blokové schéma měřicí metody dle ITU-T P.563.

neměnné aspekty řeči ve spektrogramu užitím umělých neuronových sítí. Spektrogram je dvourozměrná grafická reprezentace spektra měnícího se v čase. Spektrogramy obsahují bohaté akustické i fonetické informace. Vyhodnocování těchto grafických reprezentací mohou být zpracovávány jak strojově, tak i lidskými odborníky s dostatečnými zkušenostmi a vědomostmi.

Další příklad metody založené na pravděpodobnosti je popsán v doporučení ITU-T P.562. Tato metoda využívá tzv. INMD (in-service nonintrusive measurement devices), které mají přístup k přenosovým kanálům a mají schopnost shromažďovat objektivní informace o probíhajících hovorech bez jejich narušení. Tato nashromážděná data jsou poté dále zpracovávána a výsledkem je předpovídaná hodnota MOS, odpovídající doporučení ITU-T P.800.1 [8].

Jednou z novějších metod pro neintrusivní vyhodnocování kvality řeči je E-model, zpracovaný v doporučení ITU-T G.107 [3]. Tato metoda s užitím INMD zařízení dokáže dosáhnout velmi přesných výsledků, ale její hlavní účel je spíše nasazení při plánování nových komunikačních systémů, než nasazení v reálném čase pro vyhodnocování aktuální kvality. Touto metodou se zabývá celá 3. kapitola mé práce.

V roce 2004 ITU vydala v doporučení ITU-T P.563 (single ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephony applications) novou metodu neintrusivního získávání ohodnocení kvality řeči. ITU tuto metodu představuje jako první neintrusivní metodu, která zahrnuje všechny možné druhy rušení a zhoršení hovorového signálu ve veřejné telefonní síti s přepojováním okruhů (PSTN). Výstupem je opět hodnota MOS korespondující s doporučením ITU-T P.800.1 [8]. Blokové schéma této metody je vyobrazeno na obrázku č. 10. Algoritmus analyzuje signál na základě nepřirozeností, šumů a prázdných míst (ticha) v hovoru. Z těchto analýz se vyberou aspekty, které mají na přenášený signál největší vliv. V posledním kroku je použita mapovací funkce, která pomocí matematických operací nad těmito daty vrátí hodnotu MOS-LQO [10].

2.2.2.2 Přístup na základě znalosti (source-based) Tento přístup umožňuje univerzálnější metody než přístup na základě pravděpodobnosti výskytu zhoršení. Tyto metody mají přístup k rozsáhlému souboru všech různých typů zhoršení, kde jsou popsány porovnáním některých vlastností degradovaného signálu s modelem signálu původního.

První metody patřící do této skupiny byly založeny na tzv. PLP (perceptual-linear prediction) modelu, který porovnával "*vnímavostní*" vektory extrahované z přenášeného vzorku s "*vnímavostními*" vektory odvozenými z naprosto čistých, nijak nedegradovaných vzorků. Avšak tyto metody byly příliš náročné na svůj výpočetní čas, a tudíž velmi neefektivní.

Později bylo na tuto metodu navázáno, jenom se již extrahované vektory neporovnávaly s interní databází vytvořených vektorů, nýbrž s referenčním souborem kódů, který byl z těchto vektorů vytvořen. Tento způsob samotný výpočet zrychlil, avšak výsledná kvalita je silně závislá na obsáhlosti a kvalitě tohoto souboru [10].

3 E-model

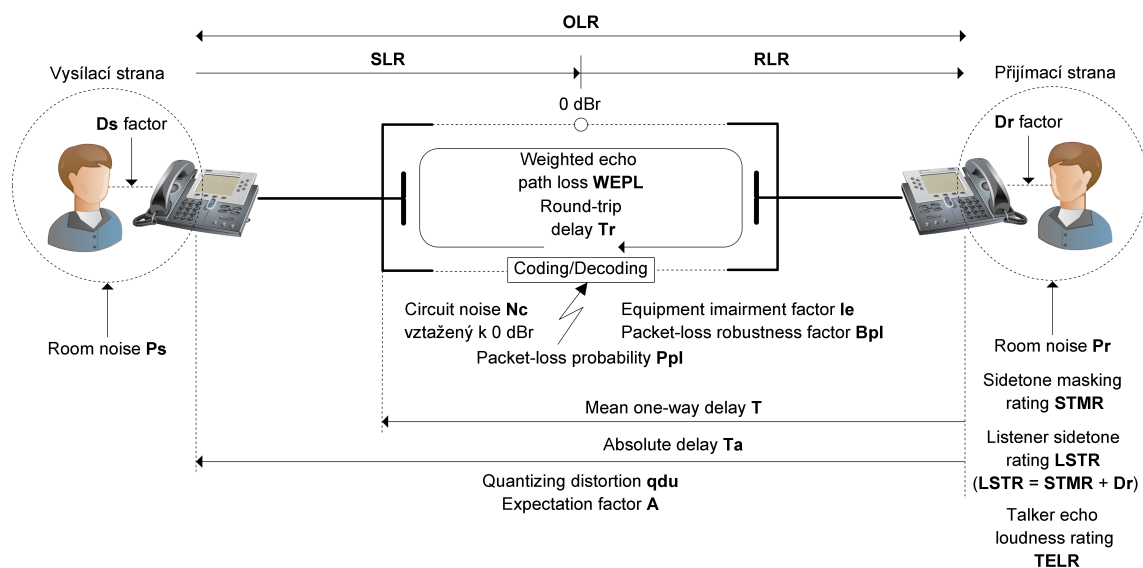
Komplexnost moderních sítí vyžaduje, aby všechny parametry přenosové cesty nebyly posuzovány izolovaně, ale aby byly brány v potaz jejich možné kombinace a vzájemné interakce. Tohoto může být částečně dosaženo odborným odhadováním ze zjištěných parametrů přenosové cesty, ale mnohem systematictější přístup nabízí užití nějakého výpočetního modelu. E-model je tedy výpočetní model, který bere v potaz všechny tyto vzájemné provázanosti přenosových parametrů a jako výstup nabízí skalár s označením R , který se mění přímo s celkovou kvalitou hovoru [1], [3], [16].

E-model je založen na metodě tzv. "*equipment impairment factor*". Původní strukturu tohoto modelu vyvinul švédský expert Nils-Olof Johannesson působící ve skupině Voice Transmission Quality from Mouth to Ear, patřící pod seskupení ETSI. V letech 1997 - 2000 tento model rozpracovala studijní skupina SG12 patřící pod ITU-T a vydala jej v doporučení ITU-T G.107 [3] s názvem E-model [16].

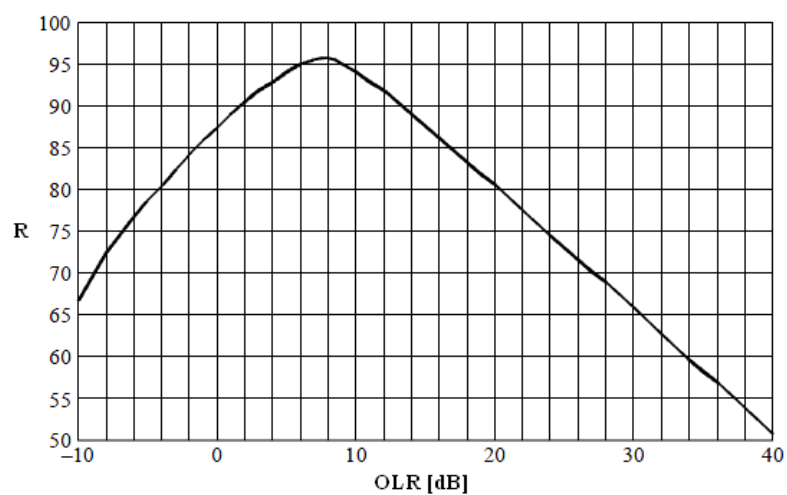
Struktura referenčního modelu spojení je znázorněna na obrázku č. 11. Zde je patrné rozdělení na vysílací a přijímací stranu, stejně tak jako parametry, se kterými E-model počítá. Rovnice v této kapitole jsou převzaty z doporučení ITU-T G.107 [3] s písemným svolením skupiny ITU.

3.1 Parametry výpočtu E-modelu

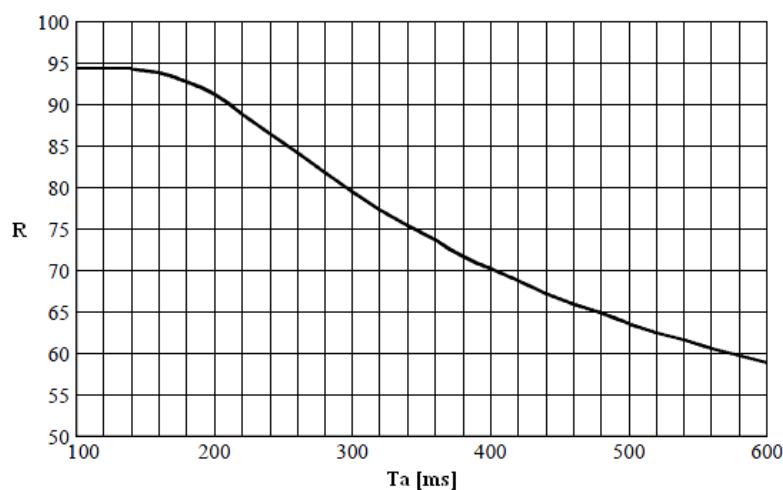
- $SLR [dB]$ (*Send Loudness Rating*) - představuje míru hlasitosti ve vysílacím směru.
- $RLR [dB]$ (*Receive Loudness Rating*) - představuje míru hlasitosti v přijímacím směru.
- $OLR [dB]$ (*Overall Loudness Rating*) - představuje celkovou míru hlasitosti. OLR , jak je patrné z referenčního modelu (viz obrázek č. 11), se vypočítá jako součet SLR a RLR ($OLR = SLR + RLR$). Zhoršení kvality způsobené OLR může plynout jak z příliš nízkých, tak vysokých hodnot. Za optimální hodnotu se udává $10 dB$, což podle doporučení ITU-T P.310 odpovídá $SLR = 8 dB$ a $RLR = 2 dB$. Graf závislosti hodnoty R na OLR je znázorněn na obrázku č. 12.
- $STMR [dB]$ (*Sidetone Masking Rating*) - představuje míru potlačení vlastního hovoru. Závisí na hodnotě impedančního vyvážení mezi telefonním vedením a účastnickou přípojkou v ústředně.
- $LSTR [dB]$ (*Listener Sidetone Rating*) - představuje míru potlačení místní vazby na přijímací straně. Hodnota není dána přímo, ale dopočítává se jako součet známých hodnot $STMR$ a Dr ($LSTR = STMR + Dr$).
- $T [ms]$ (*Mean one-way Delay*) - představuje zpoždění v jednom směru, tedy od přijímací strany na konec telefonního vedení na vysílací straně.
- $Ta [ms]$ (*Absolute Delay*) - představuje celkové zpoždění, tedy od přístroje na přijímací straně k přístroji na straně vysílací. Tento parametr je nezávislý na počtu cest ozvěn šířících se po stejném vedení. Závislost hodnoty R na tomto typu zpoždění



Obrázek 11: Referenční model spojení pro hodnocení E-modelem.



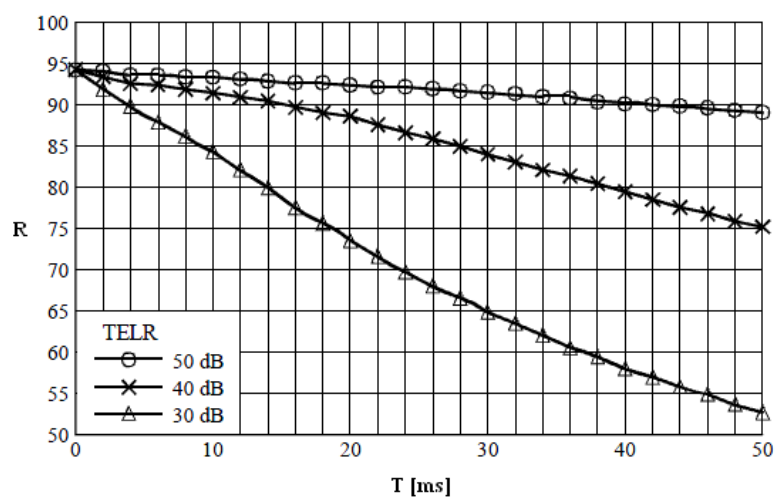
Obrázek 12: Závislost hodnoty R na OLR [4].



Obrázek 13: Závislost hodnoty R na Ta [4].

je znázorněna na obrázku č. 13, kde všechny ostatní parametry jsou nastaveny do výchozích hodnot.

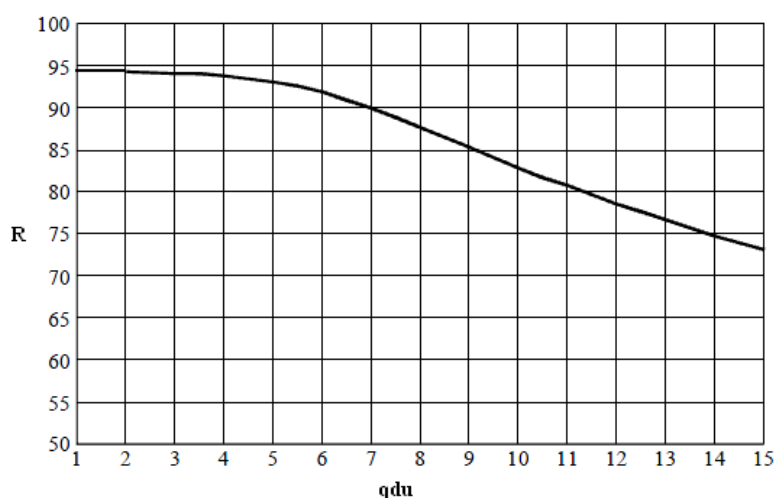
- $TEL R$ [dB] (*Talker Echo Loudness Rating*) - představuje míru hlasitosti ozvěny na straně hovořícího. Tento parametr je velmi úzce spjat s parametrem T , kde v případě klesajících hodnot $TEL R$ a rostoucích hodnot T , klesá celková kvalita přenášeného hovoru. Tato závislost je znázorněna na obrázku č. 14.
- I_e [-] (*Equipment Impairment Factor*) - představuje míru zhoršení vlivem zařízení, což také zahrnuje vliv použitého kodeku. Provizorní hodnoty I_e pro plánování v závislosti na použitém kodeku jsou uvedeny v tabulce č. 3.
- qdu [-] (*Quantization Distortion Units*) - představuje počet jednotek kvantizačního zkreslení. Jedno qdu je definováno jako kvantizační hluk vyplývající z kompletního zakódování analogového signálu na digitální a znovu dekodování z digitálního zpět na analogový. Závislost hodnoty R na počtu qdu je uvedena na obrázku č. 15.
- $WEPL$ [dB] (*Weighted Echo Path Loss*) - představuje váženou střední hodnotu ztrát ozvěny na straně příjemce. Tento parametr je prezentován rozdílem úrovně signálu hovořícího účastníka a ozvěnou příjemce.
- N_c [dBm0p] (*Electric Circuit Noise*) - představuje šumy způsobené elektrickými obvody.
- N_{for} [dBmp] (*Noise Floor*) - představuje součet rušivých signálů z různých zdrojů hluku a neúčinných signálů šířících se přes testovaný systém.
- Dt [ms] (*Difference for Absolute Delay*) - představuje rozdíl mezi celkovým zpožděním a zpožděním ozvěny v jednom směru ($Dt = Ta - T$).



Obrázek 14: Závislost hodnoty R na T při různém $TELR$ [4].

Kodek	Bitová rychlost [kbit/s]	I_e
ADPCM (G.726, G.727)	40	2
ADPCM (G.721, G.726, G.727)	32	7
ADPCM (G.726, G.727)	24	25
ADPCM (G.726, G.727)	16	50
LD-CELP (G.728)	16	7
LD-CELP (G.728)	12,8	20
CS-ACELP (G.729)	8	10
CS-ACELP (G.729A + VAD)	8	11
VSELP (IS-54)	8	20
ACELP (IS-641)	7,4	10
QCELP (IS-96-A)	8	19
RCELP (IS-127)	8	6
VSELP (Japanese PDC)	6,7	24
RPE-LTP (GSM 06.10, FR)	13	20
VSELP (GSM 06.20, HR)	5,6	23
ACELP (GSM 06.60, EFR)	12,2	5
ACELP (G.723.1)	5,3	19
MP-MLQ (G.723.1)	6,3	15

Tabulka 3: Přehled provizorních hodnot I_e [6].



Obrázek 15: Závislost hodnoty R na počtu qdu [4].

- D_s [dB] (*D-value of Telephone at Send Side*) - představuje rozdíl v citlivosti hovořícího účastníka mezi užitečným signálem a zvuky pronikajícími do mikrofonu z okolí.
- D_r [dB] (*D-value of Telephone at Receive Side*) - představuje rozdíl v citlivosti příjemce mezi užitečným signálem a zvuky pronikajícími do mikrofonu z okolí.
- P_s [dB] (*Room Noise at the Send Side*) - představuje hluk z okolí na vysílací straně.
- P_r [dB] (*Room Noise at the Receive Side*) - představuje hluk z okolí na přijímací straně.
- Bpl [-] (*Packet-loss Robustness Factor*) - představuje odolnost použitého hlasového kodeku vůči ztrátovosti paketů.
- Ppl [%] (*Packet-loss Probability*) - představuje procentuální ztrátovost všech užitečných paketů.
- $BurstR$ [-] (*Burst Ratio*) - představuje pravděpodobnost, že možné projevené ztrátovosti paketů budou shlukového charakteru či nikoliv.
- A [-] (*Advantage Factor*) - představuje faktor zvýhodnění v závislosti na potřebě soustředěnosti posluchače.

Všechny tyto uvedené parametry se spolu podílí na výsledné hodnotě R . Každý z nich má doporučenou výchozí hodnotu, při které je výsledná kvalita dle skaláru $R = 93,2$, což odpovídá přibližně hodnotě 4,4 na stupnici MOS. Jejich výchozí hodnoty včetně doporučených intervalů jsou vyneseny v tabulce v příloze A [1], [3], [4], [5], [6].

3.2 Výpočet E-modelu

Výpočet celého modelu se skládá z různých matematických operací nad parametry uvedenými v předchozí podkapitole. Samotný výpočet lze rozložit do několika komponent. Rovnice pro výpočet skaláru R je definována vztahem (1).

$$R = Ro - Is - Id - Ie-eff + A \quad (1)$$

Ro představuje základní odstup signálu od šumu, ve kterém jsou zahrnuty všechny možné druhy šumu včetně šumů způsobenými elektrickými obvody zařízení a šumy způsobených na vedení. Is zahrnuje všechny možné kombinace zhoršení, které se objevují více či méně souběžně s užitečným hlasovým signálem. Faktor Id představuje všechna zhoršení, která jsou způsobena různými kombinacemi zpoždění. $Ie-eff$ zahrnuje zhoršení způsobené užitím určitého hlasového kodeku, projevením možné ztrátovosti paketů, a jeho odolnosti vůči ztrátovosti. V poslední řadě nám parametr A celkovou výslednou kvalitu mírně zlepšuje, neboť např. v případě satelitního telefonu je uživatel na hovor více soustředěný než při běžném použití pevného terminálu v domácím prostředí [3].

3.2.1 Odstup signálu od šumu (Ro)

Základní odstup užitečného signálu od šumů se vypočítá dle vztahu (2) [3].

$$Ro = 15 - 1,5 \cdot (SLR + No) \quad (2)$$

Parametr No [dBm0p] představuje výkonový zisk všech možných zdrojů šumu a je definován vztahem:

$$No = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{Nc}{10}} \cdot 10^{\frac{Nos}{10}} \cdot 10^{\frac{Nor}{10}} \cdot 10^{\frac{Nfo}{10}} \right) \quad (3)$$

Parametry Nos [dBm0p] a Nor [dBm0p] jsou ekvivalentní parametru Nc ve vztažném bodě 0 dBr (viz obrázek č. 11), ale navíc je brán v potaz šum z okolí (na straně vysílací Ps , na straně přijímací Pr):

$$Nos = Ps - SLR - Ds - 100 + 0,004 \cdot (Ps - OLR - Ds - 14)^2 \quad (4)$$

$$Nor = RLR - 121 + Pre + 0,008 \cdot (Pre - 35)^2 \quad (5)$$

Pre [dBm0p] představuje "efektivní okolní šum" způsobený rozšířením Pr o cestu místní vazby na straně posluchače:

$$Pre = Pr + 10 \cdot \log \left[1 + 10^{\frac{(10 - LSTR)}{10}} \right] \quad (6)$$

Poslední parametr Nfo představuje hodnotu $Nfor$ přijímací strany:

$$Nfo = Nfor + RLR \quad (7)$$

3.2.2 Faktor souběžného zhoršení (I_s)

Komponenta I_s pro výpočet skaláru R zahrnuje součet všech zhoršení výsledné kvality, které mohou nastat souběžně s přenášením hlasu přes přenosovou cestu [3]. Tento faktor je definován vztahem (8).

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q \quad (8)$$

Faktor I_{olr} představuje zhoršení příliš nízkou hodnotou celkového OLR a je dán vztahem:

$$I_{olr} = 20 \cdot \left\{ \left[1 + \left(\frac{X_{olr}}{8} \right)^8 \right]^{\frac{1}{8}} - \frac{X_{olr}}{8} \right\} \quad (9)$$

Kde parametr X_{olr} je definován vztahem:

$$X_{olr} = OLR + 0,2 \cdot (64 + N_o - RLR) \quad (10)$$

Faktor I_{st} představuje zhoršení kvality způsobené neoptimální místní vazbou, je definován vztahem (11).

$$I_{st} = 12 \cdot \left[1 + \left(\frac{STMRo - 13}{6} \right)^8 \right]^{\frac{1}{8}} - 28 \cdot \left[1 + \left(\frac{STMRo + 1}{19,4} \right)^{35} \right]^{\frac{1}{35}} - 13 \cdot \left[1 + \left(\frac{STMRo - 3}{33} \right)^{13} \right]^{\frac{1}{13}} + 29 \quad (11)$$

Kde parametr $STMRo$ je definován vztahem:

$$STMRo = -10 \cdot \log \left(10^{-\frac{STM}{10}} + e^{-\frac{T}{4}} \cdot 10^{-\frac{TELR}{10}} \right) \quad (12)$$

Faktor I_q představuje zhoršení kvality způsobené kvantizačním zkreslením, je dán vztahem (13).

$$I_q = 15 \cdot \log \left(1 + 10^{Y+10Z} \right) \quad (13)$$

Kde parametry Y a Z a jejich pod-výpočty jsou definovány vztahy:

$$Y = \frac{Ro - 100}{15} + \frac{46}{8,4} - \frac{G}{9} \quad (14)$$

$$Z = \frac{46}{30} - \frac{G}{40} \quad (15)$$

$$G = 1,07 + 0,258 \cdot Q + 0,0602 \cdot Q^2 \quad (16)$$

$$Q = 37 - 15 \cdot \log(qdu) \quad (17)$$

3.2.3 Faktor zhoršení způsobeného zpožděním (I_d)

Komponenta I_d v sobě zahrnuje součet všech zhoršení výsledného přeneseného vzorku způsobené různými zpožděními a jejich kombinacemi [3]. Výpočet tohoto faktoru je dán vztahem (18).

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (18)$$

Parametr I_{dte} dává odhad pro zhoršení způsobené ozvěnou hovořící strany. Výpočet se provede dle vztahu (19).

$$I_{dte} = \left[\frac{Roe - Re}{2} + \sqrt{\frac{(Roe - Re)^2}{4} + 100} - 1 \right] \cdot (1 - e^{-T}) \quad (19)$$

Kde parametry Roe , Re a jejich pod-výpočty jsou dány vztahy:

$$Roe = -1,5 \cdot (No - RLR) \quad (20)$$

$$Re = 80 + 2,5 \cdot (TERV - 14) \quad (21)$$

$$TERV = TELR - 40 \cdot \log \left(\frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} \right) + 6 \cdot e^{-0,3 \cdot T^2} \quad (22)$$

Velmi nízké hodnoty parametru $STMR$ mohou mít maskovací účinky ozvěny vysílací strany, proto lze říci, že pro hodnoty $STMR < 9$ dB platí, že parametr $TERV$ v rovnici (21) bude nahrazen parametrem $TERVs$ definovaný vztahem (23).

$$TERVs = TERV + \frac{I_{st}}{2} \quad (23)$$

Naopak pro vysoké hodnoty parametru $STMR$ může začít být ozvěna hovořící strany více patrná, proto parametr I_{dte} v rovnici (18) je nahrazen parametrem I_{dtes} , definovaný vztahem (24).

$$I_{dtes} = \sqrt{I_{dte}^2 + I_{st}^2} \quad (24)$$

Faktor I_{dle} představuje zhoršení způsobené ozvěnou na přijímací straně:

$$I_{dle} = \frac{Ro - Rle}{2} + \sqrt{\frac{(Ro - Rle)^2}{4} + 169} \quad (25)$$

Kde parametr Rle je definován vztahem:

$$Rle = 10,5 \cdot (WEPL + 7) \cdot (Tr + 1)^{-0,25} \quad (26)$$

I_{dd} představuje zhoršení způsobené příliš velkým zpožděním Ta , které se projevuje i při precizním mechanismu potlačování ozvěn. Tento faktor je definován vztahem (27) v závislosti na Ta .

$$I_{dd} = \begin{cases} 0 & \text{pro } Ta \leq 100 \text{ ms} \\ 25 \cdot \left\{ (1 + X^6)^{\frac{1}{6}} - 3 \cdot \left[1 + \left(\frac{X}{3} \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} + 2 \right\} & \text{pro } Ta > 100 \text{ ms} \end{cases} \quad (27)$$

Příklad komunikačního systému	A
Pevný terminál	0
Mobilní terminál v budově	5
Mobilní terminál ve venkovním prostředí nebo v pohybu	10
Terminál v oblasti s těžkým přístupem (např. satelitní telefon)	20

Tabulka 4: Přehled provizorních hodnot parametru A dle ITU-T G.107 [3].

Kde parametr X je definován vztahem:

$$X = \frac{\log\left(\frac{T_a}{100}\right)}{\log(2)} \quad (28)$$

3.2.4 Faktor zhoršení způsobené zařízením ($Ie-eff$)

Zhoršení kvality přeneseného hlasu způsobené zařízením v sobě zahrnuje ovlivnění způsobené užitím určitého typu hlasového kodeku. To s sebou také přináší různou odolnost vůči možné ztrátovosti přenášených paketů. Z toho plyne, že celková hodnota $Ie-eff$ je ovlivněna také ztrátovostí a jejím charakterem. Záleží tedy, zda ztrátovost je shlukového či náhodného charakteru [3], [6].

Parametr $BurstR = 1$, pokud můžeme říci, že celková ztrátovost přenášených paketů je čistě náhodná a $BurstR > 1$, pokud ztrátovost má shlukový charakter a projevuje se v určitých pravidelných či nepravidelných časových intervalech, kde je za sebou ztraceno více paketů [3].

Komponenta $Ie-eff$ je tedy definována vztahem:

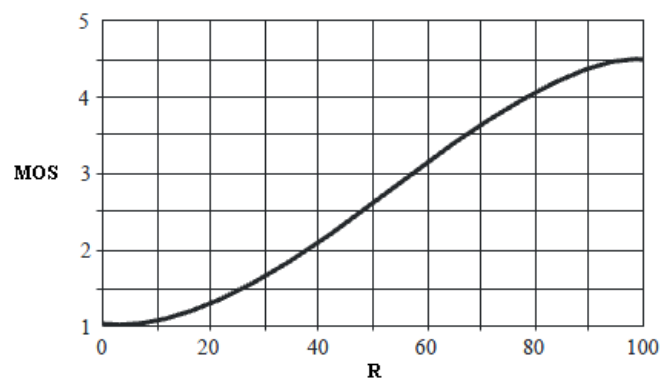
$$Ie-eff = Ie + (95 - Ie) \cdot \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}} \quad (29)$$

3.2.5 Faktor zvýhodnění (A)

Faktor zvýhodnění mírně vylepšuje celkovou hodnotu skaláru R , což je dáno tím, že za různých podmínek je kladen jiný důraz na soustředěnost posluchače. Provizorní hodnoty definované v doporučení ITU-T G.107 jsou uvedeny v tabulce č. 4 [3].

3.3 Přepočet hodnoty R na MOS

Hodnota skaláru R leží v rozsahu 0 - 100, kde nižší hodnoty blížící se k 0 odpovídají velmi nízké kvalitě a hodnoty blížící se ke 100 kvalitě vysoké. Tyto hodnoty lze přepočítat na hodnoty MOS-CQE odpovídající doporučení ITU-T P.800.1 [8], [3]. Pro přepočet je použit vztah (30).



Obrázek 16: Vztah mezi hodnotami R a MOS [3].

$$MOS-CQE = \begin{cases} 1 & \text{pro } R < 0 \\ 1 + 0,035 \cdot R + R \cdot (R - 60) \cdot (100 - R) \cdot 7 \cdot 10^{-6} & \text{pro } 0 < R < 100 \\ 4,5 & \text{pro } R > 100 \end{cases} \quad (30)$$

Vztah mezi hodnotami R a MOS není lineární a je patrný z obrázku č. 16.

4 Experiment s tandemovým zapojením kodeků a stanovení MOS

Praktická část této práce se zabývá simulováním kvality řeči pomocí výpočetní metody E-modelu a měření pomocí objektivního intrusivního testu PESQ. Měření je založeno na vlivu tandemového zapojení kodeků, tedy použití více hlasových kodeků v přenosové cestě za sebou. Dále je také brán v potaz vliv ztrátovosti paketů v jednom segmentu přenosové cesty na celkové kvalitě hovoru. Na obrázku č. 17 je uvedeno schéma zapojení experimentálního měřicího pracoviště, kde byla prováděna měření metodou PESQ.

Mezi klientským zařízením a bránou A je použit hlasový kodek G.711 μ -law (PCM), mezi bránou B a klientem kodek G.711 A-law (PCM) a mezi těmito bránami byly postupně měněny kodeky G.711 μ -law (PCM), G.711 A-law (PCM), G.729 (CS-ACELP), G.726 (ADPCM) a G.723.1 (ACELP). Mezi bránami byla dále simulována ztrátovost paketů v rozsahu 0 - 10 % s krokem 0,5 %.

4.1 Simulace užitím E-modelu

Pro možnost simulování kvality užitím E-modelu jsem vyvinul aplikaci v programovacím jazyce Java dle doporučení ITU-T G.107 (04/2009) [3]. Nad rámec doporučení je do aplikace zabudován výpočet výsledné kvality v závislosti na tandemovém zapojení hlasových kodeků. Z předchozí kapitoly je patrné, že vliv kodeků se projevuje v parametru *Ie-eff*. Výsledný vliv kaskádového zapojení kodeků je tedy v E-modelu zakomponován jako součet dílčích vlivů *Ie-eff* pro jednotlivé úseky přenosové cesty. Tento fakt lze vyjádřit vztahem (31). Aplikací rovnice (29) vyjádříme ve vztahu (32) vliv pro každý úsek přenosové cesty zvlášť.

$$Ie-eff = Ie-eff_1 + Ie-eff_2 + \dots + Ie-eff_n \quad (31)$$

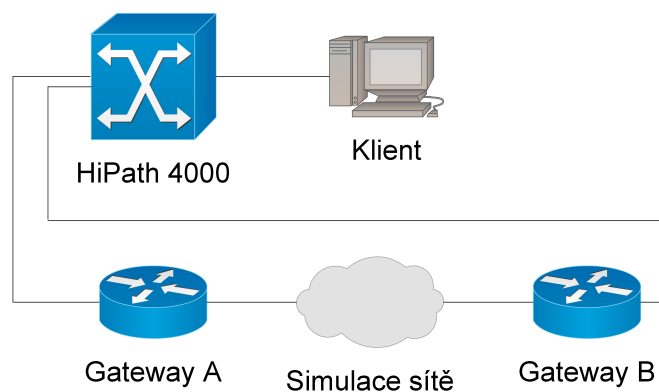
$$Ie-eff_n = Ie_n + (95 - Ie_n) \cdot \frac{Ppl_n}{\frac{Ppl_n}{BurstR} + Bpl_n} \quad (32)$$

V době psaní této práce je již aplikace verze 1.3. Ta obsahuje dále možnost vykreslování závislosti hodnoty, jak *R*, tak *MOS* na různých parametrech do grafu, který lze dále dle potřeb upravovat. K tomuto účelu byla použita freeware komponenta *JFreeChart*.

Na obrázku č. 18 je vyobrazena ukázka hlavního okna programu a výsledné simulace při nastavení všech parametrů na jejich výchozí hodnoty dle tabulky č. 7 z přílohy A. Hodnota skaláru *R* = 93,21, což se užitím rovnice (29) na přepočítá z *R* na *MOS*, rovná hodnotě 4,41.

Na obrázku č. 19 je vyobrazena ukázka vykreslení grafu pro hodnotu *R* v závislosti na ztrátovosti v rozsahu 0 - 20 %, opět při nastavení všech ostatních parametrů na výchozí hodnoty (kodek G.711).

Při měření byl na parametru *Ie* nastaven kodek G.711. Na parameteru *Ie* 2 se měnil kodek dle aktuálně měřeného a na parametru *Ie* 3 opět kodek G.711. Všechny ostatní parametry byly nastaveny do svých výchozích hodnot dle doporučení ITU-T G.107 (viz tabulka č. 7, příloha A).



Obrázek 17: Schéma zapojení experimentálního pracoviště.

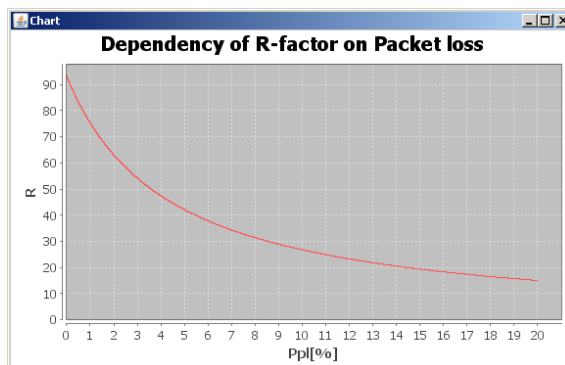
The screenshot shows the E-model v1.3 software interface. The window title is "E-model v1.3". The interface is divided into several sections. On the left, there is a list of parameters and their units. In the center, there are input fields for these parameters. On the right, there are calculated values and additional parameters. At the bottom, there are summary statistics and a "Calculate" button.

Parameter	Unit	Value	Unit	Value
Room noise (send)	Ps	(35)	(35 ÷ 85)	35.0
Room noise (receive)	Pr	(35)	(35 ÷ 85)	35.0
Sideline masking rating	STMR	(15)	(10 ÷ 20)	15.0
D-factor (send)	Ds	(3)	(-3 ÷ 3)	3.0
D-factor (receive)	Dr	(3)	(-3 ÷ 3)	3.0
Listener's sidetone rating	LSTR	STMR + Dr	-	18.0
Mean one-way delay	T	(0)	(0 ÷ 500)	0.0
Absolute delay	Ta	= T	-	0.0
Round-trip delay	Tr	= 2T	-	0.0
Weighted echo path loss	WEPL	(110)	(5 ÷ 110)	110.0
Quantizing distortion units	qdu	(1)	(1 ÷ 14)	1.0
Equipment impairment factor	le	(0)	(0 ÷ 50)	PCM - G.711 (64 kbit/s) - 0
Equipment impairment factor	le 2	-	(- ÷ 50)	0.0
Equipment impairment factor	le 3	-	(- ÷ 50)	0.0
Equipment impairment factor	le 4	-	(- ÷ 50)	0.0
Equipment impairment factor	le 5	-	(- ÷ 50)	0.0
Packet-loss robustness factor	Bpl	(1)	(1 ÷ 40)	1.0
Packet-loss probability	Ppl	(0)	(0 ÷ 20)	0.0
Burst ratio	BurstR	(1)	(1 ÷ 8)	1.0
"Found" - "Loss" transition	p	(50)	(0 ÷ 100)	50.0
"Loss" - "Found" transition	q	(50)	(0 ÷ 100)	50.0
Advantage factor	A	(0)	(0 ÷ 20)	Fixed terminal - 0

Summary statistics:

Factor R	R	Mean opinion score	MOS-CQE
		93,21	4,41

Obrázek 18: Ukázka výpočtu programem E-model v1.3 pro výchozí hodnoty všech parametrů.



Obrázek 19: Ukázka grafického výstupu programu E-model v1.3.

4.2 Ověření přístupu E-modelu ke kaskádovému zapojení kodeků

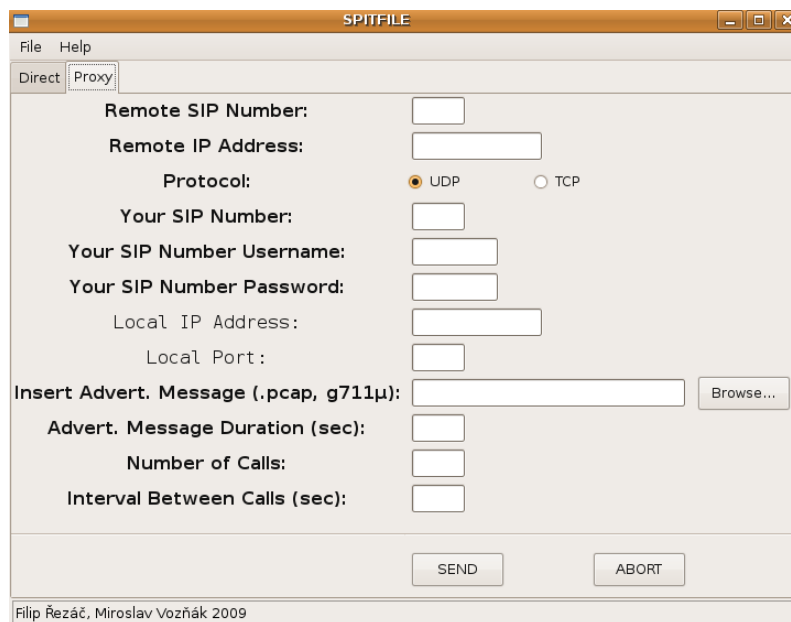
Z prostudovaných zdrojů ITU-T jsme s vedoucím bakalářské práce dospěli k závěru, že se studijní skupina SG12 tandemovým zapojením kodeků blíže nezabývala, což se stalo motivací pro prověření tohoto přístupu, kterému je věnována další podkapitola s popisem experimentu.

Abychom zjistili, do jaké míry E-model pro tento specifický případ konverguje se skutečností, bylo nutné zvolit vhodnou metodu posuzování. Pomyslným etalonem objektivních metod je hodnocení dle PESQ popsané v ITU-T P.862 [9]. Získané naměřené výstupy PESQ hodnocení byly po nezbytném přepočtu porovnány s hodnotami vypočtenými v E-modelu. Jako vhodný nástroj pro měření byl vybrán softwarový systém AQuA finské společnosti Sevana. Experimentální pracoviště bylo postaveno v laboratoři IP telefonie na katedře telekomunikační techniky. Samotná měření byla provedena studenty v rámci hodnocených laboratorních cvičení předmětu Telekomunikační sítě ve třetím týdnu letního semestru. Celkově se jednalo zhruba o 500 studentů, čemuž odpovídala nejen náročnost přípravy měření, ale i nutnost dohledu nad průběhem a neustálé validace korektnosti postupu měření.

4.3 Měření metodou PESQ

Pro studenty bylo vypracováno zadání obsahující nástin probíhajícího měření, popis jednotlivých kroků měření a požadavky na vypracování protokolu z měření. Studenti měli možnost si prakticky vyzkoušet měření touto metodou užitím softwarového systému AQuA od finské firmy Sevana, se kterou jsem během řešení své práce navázal dlouhodobější spolupráci a dále se společně s vedoucím mé bakalářské práce aktivně podílíme na testování jejich softwaru pro měření kvality řeči.

V laboratoři VoIP v budově N byly realizovány dvě pracoviště dle schématu na obrázku č. 16. Klientský počítač obsahoval jak vysílací, tak přijímací část. Vysílací část byla realizována softwarovým systémem SPITFILE (viz obrázek č. 20) vyvinutým v rámci diplomové práce Ing. Filipem Řezáčem [11], [12], [14], [15]. Tato aplikace běžela pod operačním systémem Linux (Ubuntu 9.10) na virtuálním stroji vytvořeném v aplikaci



Obrázek 20: Ukázka aplikace SPITFILE v režimu Proxy.

VMware. Příjímací část tvořila aplikace X-Lite (viz obrázek č. 21) běžící na klientském počítači pod operačním systémem Windows XP se zaregistrovaným účtem na ústředně SIEMENS HiPath 4000 [18] a se zapnutou funkcí "AA (*Auto Answer*)". Brány A a B byly realizovány směrovači od firmy Cisco Systems [17] s běžícím operačním systémem Voice IOS, kde probíhalo transkódování na bráně A z kodeku G.711 μ -law na kodeky zmíněné na začátku kapitoly č. 4 a na bráně B na kodek G.711 A-law. Simulaci sítě představoval hardwarový prvek NE1000 od americké firmy Simena [19], který umožňuje emulovat síťové parametry (v našem případě ztrátovost) v jednom zařízení. Tím pádem i vliv složitého a rozsáhlého síťového prostředí lze realizovat v laboratorních podmínkách.

4.3.1 Průběh měření metodou PESQ

Průběh měření lze rozdělit do několika kroků. Přesný postup v podobě zadání laboratorního měření pro cvičení do předmětu Telekomunikační sítě je uvedena na konci práce jako příloha C [2], [9], [11], [12], [14], [15], [16].

1. V první řadě je potřeba provést natavení brány A. Zde stačí změnit kodek na aktuálně používaný v již vytvořeném "dial-peer"-u.
2. Nyní je třeba spustit aplikaci X-Lite a zaregistrovat účet vygenerovaný na ústředně SIEMENS HiPath 4000.
3. Na virtuálním stroji s operačním systémem Linux vytvořeném aplikací VMware spustíme softwarový systém SPITFILE a v režimu Proxy vyplníme formulář dle

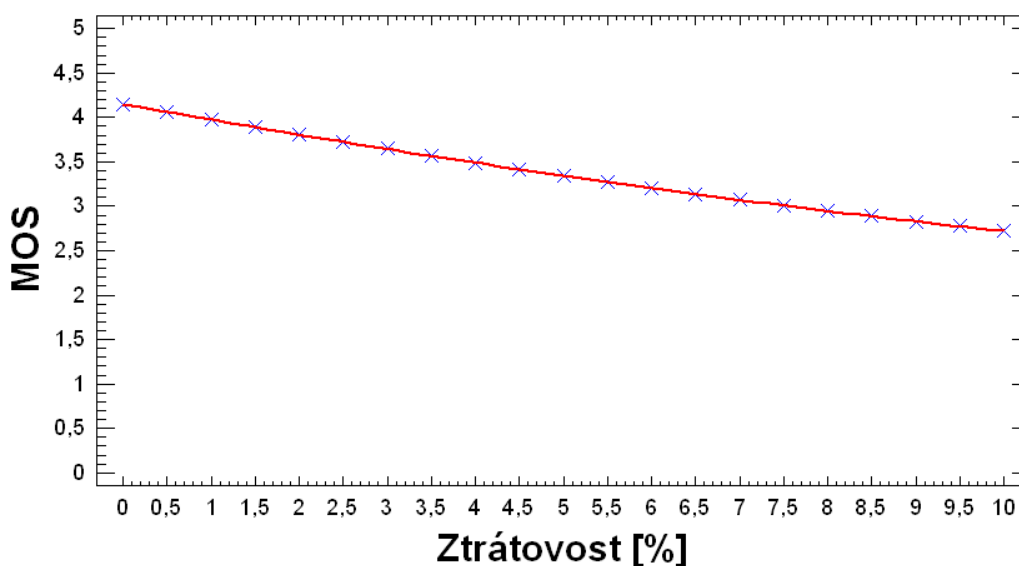


Obrázek 21: Ukázka aplikace X-Lite se zaregistrovaným účtem.

patřičných požadavků. Zadává se číslo volaného, účet volajícího a hlasová zpráva ve formátu *pcap*, včetně její délky a počtu přehrávání.

4. V dalším kroku je potřeba zapnout zachytávání síťového provozu na přijímací straně (tedy v systému Windows XP) na klientském počítači. K tomuto účelu nám poslouží aplikace Wireshark, kde zapneme zachytávání provozu na aktivní síťové kartě.
5. Nyní již lze vykonat samotný hovor pomocí aplikace SPITFILE. Jelikož je v aplikaci X-Lite povolena funkce "Auto Answer", hovor se vyzvedne sám a z reproduktorů lze slyšet přehrávanou zprávu. Kvalita zvukové zprávy se bude lišit v závislosti na použitém kodeku a velikosti ztrátovosti v segmentu sítě s tímto kodekem.
6. Po ukončení hovoru lze zastavit probíhající zachytávání síťového provozu v aplikaci Wireshark. V hlavním okně aplikace lze vidět veškeré zachycené pakety, které přišly a odešly ze síťové karty od doby zapnutí samotného zachytávání do doby vypnutí. Nyní je potřeba z těchto paketů vyfiltrovat samotný příchozí hovor. K tomuto účelu nám poslouží filtry, které lze v aplikaci Wireshark vytvořit. Tento vyfiltrovaný *stream* lze uložit jako zvukový soubor ve formátu *au* nebo *raw*.
7. Jelikož umí systém AQuA pracovat pouze se soubory ve formátu *wav*, je nutno náš vzorek ve formátu *au* nebo *raw* převést. K tomuto účelu lze využít služeb konzolové aplikace SoX, kde lze jednoduchým příkazem provést konverzi na jiný formát.
8. V posledním kroku už stačí provést porovnání získaného, přeneseného vzorku s původním, referenčním. Toto lze provést aplikací AQuA, kde je výstupem procentuální podobnost obou vzorků, hodnota PESQ a hodnota MOS.

Equipment impairment factor	<i>le</i>	(0)	(0 ÷ 50)	PCM - G.711 (64 kbit/s) - 0
Equipment impairment factor	<i>le 2</i>	-	(- ÷ 50)	CS-ACELP - G.729 (8 kbit/s) - 10
Equipment impairment factor	<i>le 3</i>	-	(- ÷ 50)	PCM - G.711 (64 kbit/s) - 0

Obrázek 22: Nastavení hodnot *le* v aplikaci E-model v1.3.

Obrázek 23: Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.729.

Měření touto metodou bylo prováděno vždy 12x pro každý krok ztrátovosti pro dané kodeky kvůli vyloučení statistické chyby. Tímto způsobem bylo tedy získáno celkem 1260 vzorků.

4.4 Naměřené výsledky

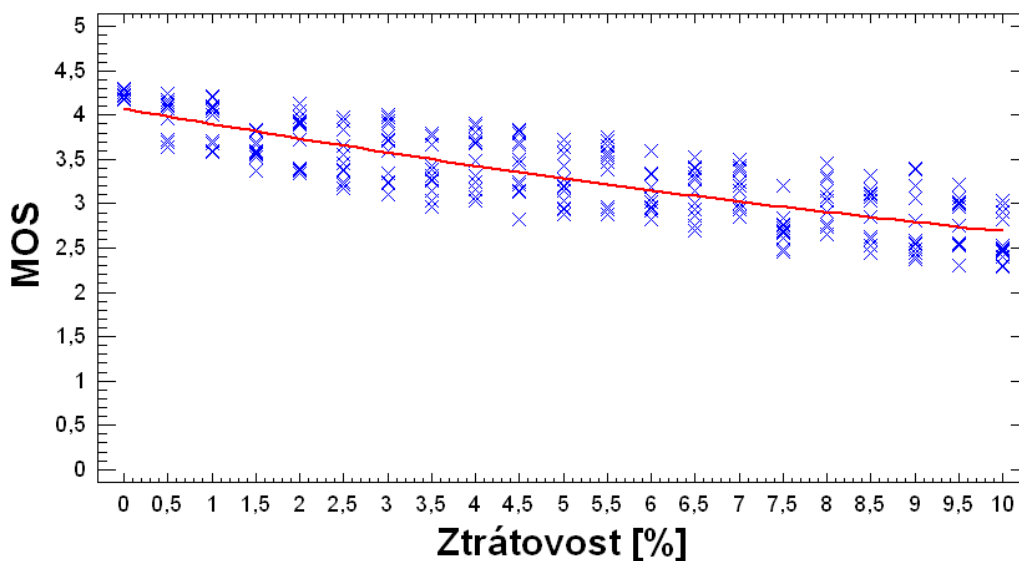
Tato podkapitola se bude zabývat prezentací výsledků pro kodek G.729. Zbytek naměřených hodnot a jejich grafické zpracování je uvedeno v příloze D kvůli své rozsáhlosti.

4.4.1 Simulace užitím E-modelu

Na obrázku č. 22 je zobrazena ukázka nastavení parametrů *le* pro náš případ tandemového zapojení. Všechny ostatní parametry podílející se na výpočtu jsou nastaveny do svých výchozích hodnot. Hodnoty byly měřeny postupně v závislosti na ztrátovosti paketů v rozmezí 0 - 10 % s krokem po 0,5 %. Naměřené hodnoty pro tento kodek jsou uvedeny v tabulce č. 5, jejich grafické zpracování na obrázku č. 23.

Ztrátovost [%]	MOS
0	4,14
0,5	4,06
1	3,98
1,5	3,89
2	3,81
2,5	3,73
3	3,65
3,5	3,57
4	3,49
4,5	3,41
5	3,34
5,5	3,27
6	3,20
6,5	3,13
7	3,07
7,5	3,01
8	2,95
8,5	2,89
9	2,83
9,5	2,78
10	2,72

Tabulka 5: Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.729.



Obrázek 24: Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.729.

4.4.2 Měření metodou PESQ

Na bráně A dle schématu zapojení měřicího pracoviště byl nastaven kodek G.729, brána A tedy transkodovala z G.711 μ -law na G.729 a brána B zpět na G.711 A-law. Hardwarovým simulátorem NE1000 se postupně měnila ztrátovost v rozsahu 0 - 10 %, opět s krokem 0,5 %. Měření pro každý krok ztrátovosti bylo opakováno 12x kvůli vyloučení možné chyby. Naměřené hodnoty užitím této metody pro kodek G.729 jsou uvedeny v tabulce č. 6, jejich grafické zpracování na obrázku č. 24.

Ztrátovost [%]	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS
0	4,30	4,28	4,21	4,26	4,22	4,21	4,30	4,21	4,19	4,17	4,21	4,21	4,17	4,21	4,23	
0,5	4,08	4,24	4,12	3,64	4,08	3,70	3,69	3,96	3,72	4,14	3,96	3,96	4,14	4,18	4,11	
1	4,04	4,01	3,58	3,68	4,09	4,20	4,21	4,05	3,60	3,71	4,05	4,05	3,71	4,08	4,10	
1,5	3,59	3,58	3,69	3,82	3,37	3,67	3,57	3,52	3,84	3,67	3,52	3,52	3,67	3,55	3,59	
2	3,73	3,40	4,04	3,35	3,92	4,13	3,91	3,38	3,94	3,37	3,38	3,38	3,37	3,97	3,89	
2,5	3,39	3,25	3,66	3,18	3,83	3,46	3,37	3,25	3,55	3,22	3,25	3,25	3,22	3,98	3,93	
3	3,93	3,72	3,77	3,10	3,23	3,59	3,91	4,00	3,71	3,35	4,00	4,00	3,35	3,25	3,98	
3,5	3,26	3,28	3,43	3,27	2,97	3,77	3,67	3,03	3,79	3,31	3,03	3,03	3,31	3,15	3,38	
4	3,49	3,16	3,69	3,90	3,73	3,24	3,32	3,08	3,88	3,68	3,08	3,08	3,68	3,81	3,03	
4,5	2,83	3,24	3,67	3,70	3,46	3,50	3,14	3,13	3,84	3,82	3,13	3,13	3,82	3,22	3,79	
5	2,94	3,64	3,28	3,04	3,43	3,20	2,95	3,57	3,19	2,88	3,57	3,57	2,88	3,72	3,15	
5,5	3,58	3,75	3,52	2,88	2,94	3,38	3,65	3,71	3,55	2,88	3,71	3,71	2,88	2,96	3,47	
6	2,96	2,92	3,06	3,19	3,33	2,82	3,02	2,95	3,02	3,60	2,95	2,95	3,60	3,34	2,82	
6,5	3,00	3,52	2,87	2,76	3,40	3,35	3,42	3,30	2,70	2,93	3,30	3,30	2,93	3,28	3,14	
7	3,15	2,93	3,50	3,01	3,37	3,21	3,40	2,85	3,25	2,96	2,85	2,85	2,96	3,43	3,37	
7,5	2,76	2,68	2,61	2,46	2,84	2,67	2,49	2,70	2,70	2,77	2,70	2,70	2,77	3,21	2,72	
8	3,07	3,29	2,66	2,77	3,03	2,91	3,32	3,46	2,65	3,08	3,46	3,46	3,08	3,15	2,74	
8,5	2,62	3,32	2,45	3,04	3,07	3,10	2,62	3,12	2,60	2,85	3,12	3,12	2,85	2,53	3,16	
9	2,44	2,40	3,06	2,81	3,40	2,54	2,48	2,37	3,20	2,55	2,37	2,37	2,55	3,39	2,59	
9,5	3,01	2,54	2,99	2,53	3,22	2,31	3,06	2,55	3,02	2,76	2,55	2,55	2,76	2,97	2,55	
10	2,31	2,53	2,83	2,46	2,29	3,04	2,48	2,50	2,91	2,47	2,50	2,50	2,47	2,40	2,98	

Tabulka 6: Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.729.

5 Vyhodnocení získaných dat a návrh korekční funkce

Z výsledků naměřených metodou PESQ (grafy a tabulky v příloze D a pro kodek G.729 v předchozí kapitole) je patrná nehomogenita a rozptýl výsledků pro stejné hodnoty Ppl , tedy ztrátovosti paketů. Výsledná kvalita řeči je značně závislá na způsobu rozložení projevených ztrát, proto bylo důležité měření opakovat. Pro sjednocení výsledků a jejich vykreslení do grafů jsem využil polynomické regrese druhého řádu. Vzorec pro výpočet takovýchto vážených hodnot je dán vztahem (33).

$$MOS(Ppl) = x + y \cdot Ppl + z \cdot Ppl^2 \quad (33)$$

Pro demonstraci opět zvolím kodek G.729 a regresní funkce s koeficienty pro tento kodek vypadá následovně:

$$MOS(Ppl) = 4,07378 - 0,17635 \cdot Ppl + 0,00380 \cdot Ppl^2 \quad (34)$$

Užití této metody sebou však přináší jisté chyby výsledků, proto je dobré stanovit absolutní a směrodatnou odchylku. Absolutní odchylku (AE - Absolute Error) lze určit ze vztahu:

$$AE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |a_i - b_i| \quad (35)$$

Zde parametr n představuje celkový počet hodnot, v našem případě hodnot Ppl , které jsou v rozmezí 0 - 10 % s krokem 0,5 %, tedy $n = 21$. Parametr a_i představuje hodnoty získané regresní funkcí a parametr b_i hodnoty skutečné. Absolutní odchylka pro kodek G.729 počítaná dle vztahu (35) je tedy rovna 0,25441.

Směrodatná chyba (SE - Standard Error) je dána vztahem:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a}_i)^2} \quad (36)$$

Kde parametr n opět představuje celkový počet hodnot, tedy $n = 21$. Stejně tak parametr a_i představuje hodnoty získané regresní funkcí a \bar{a}_i je nad nimi aritmetický průměr. Směrodatná odchylka pro kodek G.729 je tedy rovna 0,28565.

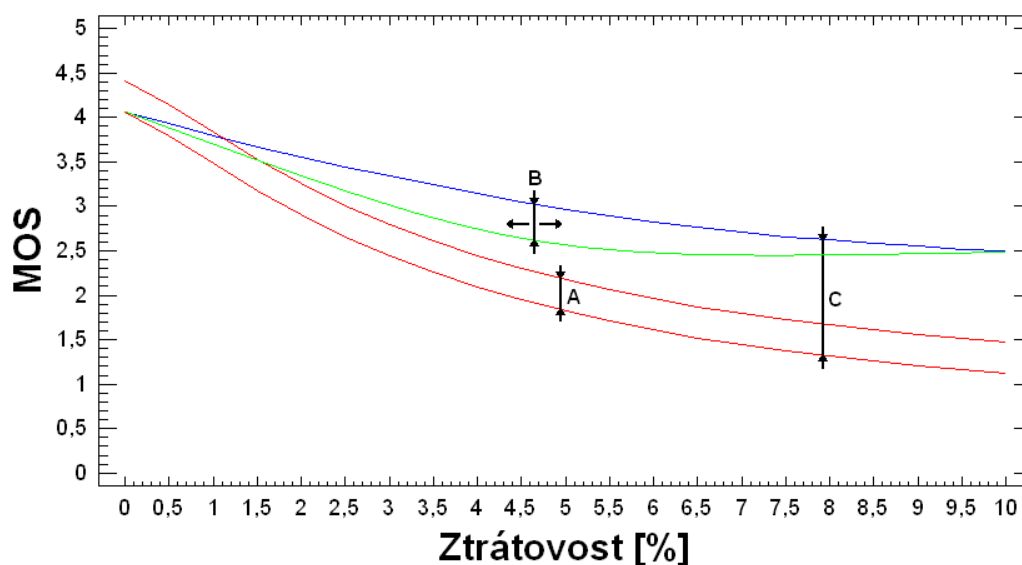
Přehled hodnot získaných polynomickou regresí včetně koeficientů a odchylek je uveden v tabulce č. 7. Pro stanovení koeficientů polynomické regrese jsem zvolil software Statgraphics verze 5.0.

Srovnáním hodnot získaných simulací E-modelem a změřených metodou PESQ je patrné, že hodnoty jsou si blízké avšak rovny si nejsou. Rozdíly ale nečiní více jak jeden stupeň MOS. Budeme-li považovat hodnoty získané měřením metodou PESQ za správné, je potřeba na hodnoty MOS simulované E-modelem navrhnout jistou korekční funkci. Označme tedy $MOS(Ppl)'$ hodnoty získané po korekci a $MOS(Ppl)$ hodnoty původní. Hodnoty jsou závislé na aktuální velikosti ztrátovosti (Ppl). Výsledná funkce tedy může vypadat následovně:

$$MOS(Ppl)' = MOS(Ppl) - \left\{ \underbrace{a}_{A} + \underbrace{[b \cdot (Ppl - c)^2 - d]}_B + \underbrace{(Ppl \cdot e)}_C \right\} \quad (37)$$

Ztrátovost [%]	G.711 μ -law	G.711 A-law	G.729	G.726	G.723.1
0	4,10	4,10	4,07	4,27	3,78
0,5	3,98	3,95	3,99	4,20	3,77
1	3,85	3,82	3,90	4,14	3,75
1,5	3,73	3,69	3,82	4,07	3,72
2	3,61	3,57	3,74	4,01	3,69
2,5	3,48	3,46	3,66	3,94	3,66
3	3,36	3,35	3,58	3,87	3,62
3,5	3,23	3,24	3,50	3,80	3,58
4	3,10	3,15	3,43	3,73	3,53
4,5	2,97	3,06	3,36	3,66	3,48
5	2,84	2,98	3,29	3,59	3,42
5,5	2,71	2,90	3,22	3,52	3,36
6	2,58	2,83	3,15	3,44	3,29
6,5	2,45	2,76	3,09	3,37	3,22
7	2,31	2,71	3,03	3,29	3,14
7,5	2,17	2,66	2,96	3,22	3,06
8	2,04	2,61	2,91	3,14	2,98
8,5	1,90	2,57	2,85	3,06	2,89
9	1,76	2,54	2,79	2,98	2,79
9,5	1,62	2,52	2,74	2,90	2,69
10	1,48	2,50	2,69	2,82	2,58
x	4,09525	4,09527	4,07378	4,26563	3,78060
y	-0,23878	-0,28802	-0,17635	-0,12528	-0,02367
z	-0,00231	0,01281	0,00380	-0,00197	-0,00960
AE	0,27846	0,32485	0,25441	0,27884	0,23920
SE	0,32413	0,36220	0,28565	0,31426	0,27443

Tabulka 7: Hodnoty získané polynomicou regresí včetně jejich koeficientů a odchylek.



Obrázek 25: Vysvětlení parametrů korekční funkce.

Koeficient	G.711 μ -law	G.711 A-law	G.729	G.726	G.723.1
a	0,31	0,34	0,07	-0,06	0,01
b	0,038	0,019	0	0,0033	0,0115
c	5	5	0	6	5
d	0,98	0,5	0	0,09	0,315
e	0	-0,14	-0,0035	0,015	0,009

Tabulka 8: Přehled koeficientů korekční funkce pro jednotlivé kodeky.

Vysvětlení jednotlivých komponent korekční funkce je znázorněno na obrázku č. 25. Parametr označený jako A představuje posunutí všech hodnot nezávisle na ztrátovosti (Ppl) o a nahoru nebo dolů, je-li difference mezi původními hodnotami a očekávanými hodnotami MOS konstantní. Parametr B upravuje původní hodnoty, liší-li se od referenčních hyperbolicky, tedy existuje taková hodnota ztrátovosti Ppl , při které je difference mezi původními hodnotami a očekávanými hodnotami MOS největší (nebo naopak nejmenší v případě prohnutí nahoru) a pro všechny ostatní rozdíly MOS hodnot platí, že od této hodnoty klesají (nebo rostou pro případ prohnutí nahoru). Koeficient c tedy představuje tento vrchol hyperboly, kde je difference největší, koeficient d její velikost a koeficient b otočení této hyperboly v závislosti na znaménku a její celkový "průměr". V poslední řadě parametr C upravuje výsledné hodnoty, roste-li rozdíl mezi původními hodnotami a očekávanými hodnotami MOS lineárně s rostoucí ztrátovostí. V tabulce č. 8 jsou uvedeny navržené hodnoty koeficientů korekční funkce pro jednotlivé kodeky.

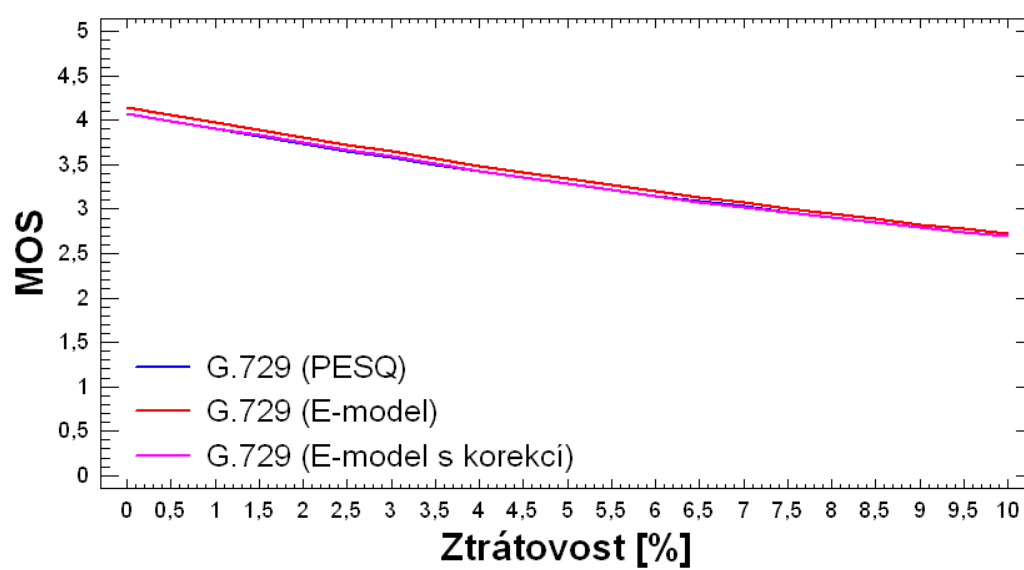
V tabulce č. 9 jsou uvedeny hodnoty získané měřením metodou PESQ, na které byla použita polynomičká regrese, hodnoty získané simulováním užitím E-modelu a hodnoty získané simulováním užitím E-modelu, na které byla použita navržená korekční funkce

Ztrátovost [%]	PESQ [MOS]	E-model [MOS]	E-model s kor. [MOS]	Dif.
0	4,07	4,14	4,07	0,00
0,5	3,99	4,06	3,99	0,00
1	3,90	3,98	3,91	-0,01
1,5	3,82	3,89	3,83	-0,01
2	3,74	3,81	3,75	-0,01
2,5	3,66	3,73	3,67	-0,01
3	3,58	3,65	3,59	-0,01
3,5	3,50	3,57	3,51	-0,01
4	3,43	3,49	3,43	0,00
4,5	3,36	3,41	3,36	0,00
5	3,29	3,34	3,29	0,00
5,5	3,22	3,27	3,22	0,00
6	3,15	3,20	3,15	0,00
6,5	3,09	3,13	3,08	0,01
7	3,03	3,07	3,02	0,01
7,5	2,96	3,01	2,97	-0,01
8	2,91	2,95	2,91	0,00
8,5	2,85	2,89	2,85	0,00
9	2,79	2,83	2,79	0,00
9,5	2,74	2,78	2,74	0,00
10	2,69	2,72	2,69	0,00

Tabulka 9: Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.729.

pro kodek G.729. Sloupec s názvem "Dif." (difference) zobrazuje rozdíl mezi hodnotami získanými metodou PESQ a hodnotami simulovanými E-modelem po korekci. Na obrázku č. 26 jsou v grafu všechny tyto tři křivky vyneseny na porovnání. Takovéto tabulky a grafy pro ostatní měřené kodeky jsou uvedeny v příloze E kvůli své rozsáhlosti.

Z grafu na obrázku č. 26 a obrázcích uvedených v příloze E je patrné, že po korekci hodnot získaných E-modelem jsou si měřené výsledky již téměř rovny. Diference mezi těmito křivkami již nedosahuje více jak jedné desetiny jednoho stupně hodnoty MOS. Z tohoto lze usoudit, že navržená korekční funkce je správná, záleží pouze na volbě správných koeficientů.



Obrázek 26: Porovnání křivek získaných měřením metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.729.

6 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval hodnocením kvality řeči. Svou práci jsem rozdělil do několika stěžejních částí. První část práce (kapitola 2.) jsem věnoval základním metodám hodnocení kvality řeči a jejich nejdůležitějším zástupcům z řad metod jak subjektivních, tak objektivních. Cílem úvodní části bylo vysvětlení principů současných technik určování kvality řeči a jejich různá úskalí. Další kapitola (kapitola 3.) popisuje moderní přístup k výpočtu odhadované kvality, kterým je matematický výpočetní model používaný především při plánování nových telekomunikačních sítí a okruhů, E-model. Tato metoda je zařazena mezi objektivní neintrusivní metody a našla své uplatnění především v technologii Voice over IP. Vycházel jsem především z doporučení ITU-T G.107 [3] a z doporučení s E-modelem úzce souvisejících [4], [5], [6]. Tato část zahrnuje jak popis samotné problematiky výpočtu, tak i popis jednotlivých dílčích parametrů výpočtu.

V praktické části jsem se po dohodě se svým vedoucím práce zaměřil na tandemové zapojení kodeků v kombinaci s projevenou ztrátovostí paketů v IP síti. Pro srovnání výsledků získaných simulováním hodnot v E-modelu jsem navrhl experimentální měřicí pracoviště v laboratoři IP telefonie, kde bylo využito intrusivní objektivní metody PESQ dle doporučení ITU-T P.862 [9], která je dnes považována de-facto za referenční metodu pro stanovení MOS. Tato část měření byla realizována studenty bakalářského studia prezenční formy na katedře telekomunikační techniky v rámci předmětu Telekomunikační sítě. Měření se zúčastnilo na pět set studentů, čímž byl získán soubor výsledků, se kterým jsem dále pracoval. Přístup studijní skupiny SG12 v ITU-T k problematice tandemových zapojení kodeků byl značně zjednodušen a vycházel pouze z dílčích příspěvků zhoršení na jednotlivých úsecích. Hodnoty získané měřením objektivní metodou PESQ nekorespondovaly stoprocentně s E-modelem, a proto bylo nutné navrhnout korekční funkci, která byla aplikována pro kaskádové zapojení kodeků. Srovnáním grafických výstupů bylo zjištěno, že navržením správných koeficientů korekční funkce pro daný kodek, dokážeme užitím E-modelu dosáhnout téměř stejných výsledků jako užitím metody PESQ. Provedená měření v laboratoři ukázala, že E-model vykazoval pro případ tandemového zapojení kodeků odchylku v řádech desetin až jednoho stupně MOS od hodnot zjištěných pomocí PESQ. Aplikací navržené korekční funkce do E-modelu lze tuto odchylku snížit na setiny jednoho stupně MOS.

Cílem této práce bylo shrnout a popsat používané metody pro ohodnocení výsledné kvality řeči hovorového signálu. Dále tuto skutečnost ověřit výpočetní cestou užitím E-modelu a výstupy dle jeho současného stavu srovnat s objektivní metodou PESQ. Největším přínosem této práce bylo navržení korekce v E-modelu pro tandemové zapojení kodeků, jejímž podkladem byl rozsáhlý experiment, kterého se zúčastnilo cca pět set studentů. Dalším výstupem této práce je aplikace v programovacím jazyce Java, která usnadňuje výpočet pro koncového uživatele a obsahuje implementaci pro případ tandemového zapojení kodeků. Poslední verze ITU-T G.107 [3] je z roku 2009 a vývoj E-modelu není zdaleka dosud ukončen. Řešení bakalářské práce mi umožnilo seznámit se s metodami hodnocení kvality řeči a podstatně rozšířilo můj odborný rozhled. Chtěl bych se této oblasti věnovat i nadále a během dalšího studia rozvíjet získané znalosti.

7 Reference

- [1] Vozňák, Miroslav, *Spojovací systémy*, Ostrava: VŠB - TUO, 2009.
- [2] Vozňák, Miroslav, *Voice over IP*, Ostrava: VŠB - TUO, 2009.
- [3] ITU-T Recommendation G.107, *The E-model: A computational model for use in transmission planning.*, Geneva, 04/2009.
- [4] ITU-T Recommendation G.108, *Application of the E-model: A planning guide.*, Geneva, 09/1999.
- [5] ITU-T Recommendation G.109, *Definition of categories of speech transmission quality.*, Geneva, 09/1999.
- [6] ITU-T Recommendation G.113, *Transmission impairments due to speech processing.*, Geneva, 11/2007.
- [7] ITU-T Recommendation P.800, *Methods for subjective determination of transmission quality.*, Geneva, 08/1996.
- [8] ITU-T Recommendation P.800.1, *Mean Opinion Score (MOS) terminology.*, Geneva, 07/2006.
- [9] ITU-T Recommendation P.862, *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs.*, Geneva, 02/2001.
- [10] Abdulhussain E. Mahdi, Dorel Picovici, *Advances in voice quality measurement in modern telecommunications.*, Digital Signal Processing, Volume 19, Issue 1, January 2009, Pages 79-103, ISSN 1051-2004, DOI: 10.1016/j.dsp.2007.11.006. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WDJ-4RDR1CB-1/2/958e88d22cf9264b6e3c6bbc55a4bac4>
- [11] Řezáč, Filip, *Diplomová práce - Zabezpečená komunikace na SIP protokolu.*, Ostrava, 2009.
- [12] Řezáč, Filip, *Uživatelská příručka k aplikaci SPITFILE.*, Ostrava, 2009.
- [13] J. Palakal, M. J. Zoran, *Feature extraction from speech spectrograms using multi-layered network models.*, Proc. IEEE International Workshop on Tools for Artificial Intelligence, Architectures, Languages and Algorithms, 1989, pp. 224–230.
- [14] Vozňák, M., Řezáč, F., *The implementation of SPAM over Internet telephony and a defence against this attack.*, Publisher: Asszisztencia Szervező Kft. Budapest, 32nd International Conference TSP, August 26th-27th 2009, Dunakiliti, Hungary, ISBN 978-963-06-7716-5.
- [15] Vozňák, M., Růžička, J., Řezáč, F., *Spam over Internet Telephony with SPITFILE. TERENA Networking Conference.*, 2009, Malaga, 9-11.6.2009.

- [16] Vozňák,M., *Kvalita hlasu v prostředí VoIP.*, V IT časopise Connect!, str.14-17, číslo 05/2009. Computer Press, ISSN 1211-3085, květen 2009.
- [17] Cisco Systems, Inc., <http://www.cisco.com/>
- [18] Siemens, <http://www.siemens.com/entry/cc/en/>
- [19] Simena, <http://www.simena.net/>

A Výchozí hodnoty parametrů E-modelu

Výchozí hodnoty všech parametrů pro výpočet E-modelu dle doporučení ITU-T G.107 (uvedeno na další straně).

Parametr	Jednotka	Výchozí hodnota	Povolený interval
SLR	dB	8	0...18
RLR	dB	2	-5...14
STMR	dB	15	10...20
LSTR	dB	18	13...23
Ds	-	3	-3...3
Dr	-	3	-3...3
TELR	dB	65	5...65
WEPL	dB	110	5...10
T	ms	0	0...500
Tr	ms	0	0...1000
Ta	ms	0	0...500
qdu	-	1	1...14
Ie	-	0	0...40
Bpl	-	4,3	4,3...40
Ppl	%	0	0...20
BurstR	-	1	1...8
Nc	dBm0p	-70	-80...-40
Nfor	dBmp	-64	-
Ps	dB	35	35...85
Pr	dB	35	35...85
A	-	0	0...20

Tabulka 10: Přehled výchozích hodnot a povolených intervalů vstupních parametrů E-modelu [3].

B Aplikace pro simulaci výsledků pomocí E-modelu

B.1 Specifikace aplikace

Aplikace je naprogramována v jazyce Java, takže není platformě závislá a funguje na každém operačním systému podporující Java Standard Edition aplikaci. Tato aplikace slouží k simulaci hodnot predikované kvality řeči na základě doporučení ITU-T G.107 (04/2009). Nad rámec doporučení je obsažena možnost simulace vlivu tandemového zapojení hlasových kodeků. Aplikace také dokáže díky komponentě JFreeChart vykreslovat grafy hodnot R a MOS v závislosti na zvoleném intervalu různých parametrů. Aplikace je v současné době ve verzi 1.3 a je stále v aktivním vývoji.

B.2 Instalace a spuštění

Aplikace vyžaduje ze strany uživatele mít pouze nainstalováno běhové prostředí Javy (Java Runtime Environment - JRE). Pokud již máte JRE nainstalováno, ale přesto má aplikace problém se spuštěním doporučuji provést aktualizace JRE přímo z webové stránky výrobce, společnosti Sun Microsystems - <http://java.sun.com/>.

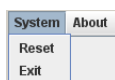
Na CD v adresáři *E-model* nebo na webu http://homel.vsb.cz/voz29/E_model.zip se nachází aplikace E-model v1.3. K samotnému spuštění není potřeba aplikaci nijak instalovat, stačí pouze mít adresář *lib* a soubor *E-model.jar* v jednom umístění, neboť právě adresář *lib* obsahuje soubory s komponenty JFreeChart a jiné. Spuštění aplikace se provede v grafickém prostředí operačního systému dvojím kliknutím na soubor *E-model.jar*. V CLI (Command Line) operačního systému lze program spustit pomocí příkazu `java -jar "E-model.jar"`. Po spuštění se objeví hlavní grafické okno aplikace se samotnými prvky a je umožněno pracovat.

B.3 Ovládání aplikace

Základní ovládání aplikace se provádí skrze menu umístěné v horní části okna programu (viz obrázek č. 27). Menu nabízí dvě hlavní tlačítka:

- System
 - Reset - slouží k nastavení všech hodnot do svých výchozích stavů.
 - Exit - slouží k vypnutí aplikace.
- About
 - Info - obsahuje základní informace o aktuální verzi a kontakty.

Samotné ovládání aplikace je intuitivní. Do kolonek stačí vyplnit hodnoty dle příslušných parametrů a jejich povolených rozsahů. U některých hodnot nelze zadat hodnotu přímo, ale tu lze vybrat prostřednictvím pop-up menu, kde se nachází soubor provizorních hodnot dle doporučení od ITU-T.



Obrázek 27: Ukázka ovládacího menu aplikace.

	↓ Ppl	↓ Ppl max	↓ Bpl
PCM - G.711 (64 kbit/s) - 0	3.0	0.0	1.0
ADPCM - (32 kbit/s) - 7	0.0	0.0	1.0
CS-ACELP - G.729 (8 kbit/s) - 10	1.5	0.0	1.0
.....	0.0	0.0	1.0
.....	0.0	0.0	1.0
1.0		1.0	
0.0	Split	[%]	0.0

Obrázek 28: Ukázka režimu Split pro tandemové zapojení kodeků.

Výběr z pop-up menu u hodnoty *Ppl* značí způsob zadávání ztrátovosti (*Ppl*) a odolnosti kodeku vůči ztrátovosti (*Bpl*) při využití tandemového zapojení kodeků. Položka *Static* znamená, že při tandemovém zapojení kodeků bude v každém segmentu sítě stejná hodnota jak *Ppl*, tak *Bpl*. Zvolením položky *Split* se zablokuje možnost standardního vložení hodnot pro *Ppl* a *Bpl* a povolí se vložení těchto hodnot separátně pro každý kodek zvlášť (viz obrázek č. 28).

Pop-up menu u parametru *BurstR* s položkami *Direct Value* nebo *BurstR = 1/(p+q)* značí způsob zadávání hodnot parametru *BurstR*. V režimu *Direct Value* je možné hodnotu pro parametr *BurstR* zadat přímo, v režimu *BurstR = 1/(p+q)* je nutno vyplnit hodnoty *p* a *q*, kde posléze výpočet parametru *BurstR* probíhá dle následujícího vztahu:

$$BurstR = \frac{1}{p + q} \quad (38)$$

Tento výpočet odpovídá dvoustavovému Markovského modelu s přechodem mezi stavem "nalezeno - ztraceno" (parametr *p*) a "ztraceno - nalezeno" (parametr *q*).

Vykreslení grafických závislostí hodnot *R* a *MOS* na některém z parametrů se provede zatržením možnosti v pravé části vyžadovaného parametru. Po vybrání jedné závislosti se ostatní deaktivují, neboť je možné vykreslovat pouze v závislosti na jednom parametru. Touto volbou dostaneme grafy jak pro hodnotu *R*, tak pro *MOS*.

V dolní části okna aplikace se nachází tlačítko *Compute*, které slouží k samotnému provedení výpočtu. Položky pod ním představují místo, kde se po vykonané simulaci zobrazí výsledek hodnoty *R* a *MOS*. V případě zvolené možnosti vykreslení grafické závislosti se vypíší obě krajní hodnoty.

B.4 Troubleshooting

- Q: Aplikace má problémy při svém spouštění.
- A: Ujistěte se, zda máte aktualizovanou verzi běhového prostředí JRE.

- **Q: Aplikaci spouštím z archivu a vypisuje chybu s chybějícími knihovnamí.**
- A: Aplikaci nelze spouštět z archivu. Před svým spuštěním je potřeba celý archiv extrahovat a ujistit se, že adresář *lib* a spouštěcí soubor se nachází v témže umístění.
- **Q: Jiné chyby.**
- A: Kontaktujte mne prosím na e-mailu tom603@vsb.cz. Aplikace je stále ve vývoji, proto prosím omluvte drobné nedostatky.

C Zadání laboratorního měření

C.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení měřicího pracoviště je znázorněno na obrázku č. 25. Na lince mezi účastníkem (Klient) a telefonní ústřednou SIEMENS (HiPath 4000) je použit hlasový kodek G.711 (PCM). Na linkách mezi bránami (Gateway A a B) je použit kodek dle zadání cvičícího. Simulaci síťového prostředí poskytuje hardwarový emulátor NE1000 od americké firmy Simena. Zde se nastavuje celková ztrátovost procházejících paketů. Nastavení tohoto prvku provádí cvičící! **Na pracovišti používejte operační systém Windows XP!**

C.2 Nastavení gateway

Gateway A IP: **158.196.142.5**

Všechna hesla: **labn211**

Tato konfigurace se provádí za celé cvičení pouze jedenkrát a pouze na jednom pracovišti. Konfigurace bran probíhá pomocí vzdáleného přístupu (telnet). K tomuto účelu postačí program Příkazová řádka (Start → Spustit → cmd → Ok). Konfigurace Gateway:

C:\> **telnet 158.196.142.5**

Password: **labn211**

GTW_A> **enable**

Password: **labn211**

GTW_A# **configure terminal**

GTW_A(config)# **dial-peer voice 11 voip**

GTW_A(config-dial-peer)# **codec X**

GTW_A(config-dial-peer)# **no vad**

GTW_A(config-dial-peer)# **exit**

GTW_A(config)# **exit**

GTW_A# **exit**

Místo X nutno dosadit: Používaný hlasový kodek mezi bránami. (Přidělí cvičící.) Dostupné kodeky: **g711alaw**, **g711ulaw**, **g723r53**, **g726r32**, **g729r8**.

C.3 X-Lite, VMware

Spustíte program X-Lite (ikona na ploše, popř. v nabídce Start). Do nastavení účtu se dostanete přes **kliknutí na „trojúhelník“** v horní části a vyberete nabídku **SIP Account Settings**. Pokud už je nějaký účet vytvořen, smažte jej a vytvořte vlastní, dle následujících pokynů:

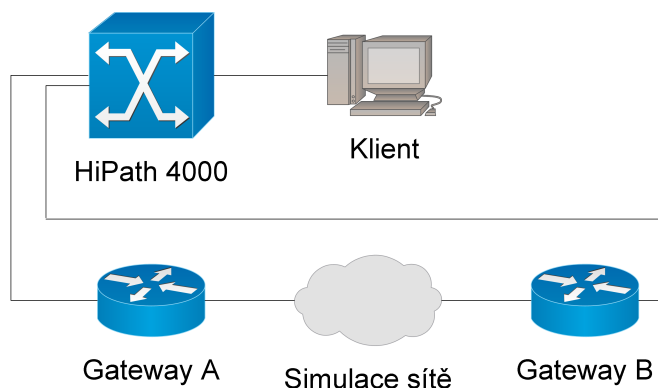
Display name: **X**

User name: **X**

Password: **123456**

Authorization user name: **X**

Domain: **158.196.146.75**



Obrázek 29: Schéma zapojení měřicího pracoviště.

V záložce Voicemail nezapomeňte zrušit políčko „Check for Voicemail“. Po potvrzení a vybrání účtu budete automaticky připojeni.

Místo X nutno dosadit: jedno pracoviště **2793**, druhé **2791**.

Z adresy http://pcn211j.vsb.cz/ts2010/TS_VoIP_2010.rar lze stáhnout přichystaný virtuální stroj pro software VMware Workstation. Na tomto stroji je nainstalován operační systém Linux (Ubuntu 9.10). Spouštění se provádí prostřednictvím programu **VMware Workstaton: File → Open → (umístění stažené složky „TS_VoIP_2010“) → TS_VoIP_2010.vmx**. Poté klikněte na tlačítko „**Play Virtual Machine**“, čímž spustíte samotnou virtuální stanic. Veškerá okna potvrďte tlačítkem **Ok**.

C.4 SPITFILE

Nyní se můžete přesunout do virtuálního stroje vytvořeného v programu VMware. Zde by se již měl nacházet přednastavený a spuštěný softwarový systém pro generování hovorů SPITFILE. V případě problému lze program znovu spustit pomocí souboru **SPIT-FILE.sh** umístěného na ploše. Pracovat budeme v režimu Proxy (druhá horní záložka). Nastavení je následovné:

Destination: **810X**

SIP Server IP: **158.196.146.75**

Protocol: **UDP**

Your ID: **Y**

SIP ID Username: **Y**

SIP ID Password: **123456**

Local IP Address: **Z**

Local Port: **5060**

Insert Advert. Message: **/home/student/Plocha/SPITFILE/pcap_examples/orig.pcap**

Advert. Message Duration: **10**

Number of Calls: **1**

Interval Between Calls: 1

Místo X nutno dosadit: Číslo, které jste registrovali v programu X-Lite. Tedy 2793 nebo 2791.

Místo Y nutno dosadit: Pokud jste za X dosadili 2793, tak **Y = 2794**, v jiném případě (tedy pokud jste za X dali 2791), tak **Y = 2792**.

Místo Z nutno dosadit: IP adresu rozhraní uvnitř vašeho virtuálního stroje, nikoliv IP adresu z OS Windows. Toto lze provést následovně prostřednictvím terminálu v Ubuntu:

```
student@student-desktop:~$ sudo dhclient eth0
[sudo] password for student: student
student@student-desktop:~$ ifconfig eth0
```

Nyní by se v položce **inet-adr:** měla nacházet IP adresa rozhraní eth0 vašeho virtuálního stroje, kterou dosadíte místo Z.

C.5 Wireshark

V průběhu měření budete zachytávat provoz hovorů prostřednictvím programu Wireshark (ikona na ploše, popř. v nabídce Start). Zapnutí zachytávání veškerého příchozího a odchozího provozu lze provést následovně: **Capture** → **Interfaces** → (**Vyberete aktivní síťovou kartu počítače**) → **Start**. V ploše pracovního okna nyní můžete vidět veškerý provoz, který přichází a odchází ze zvoleného rozhraní.

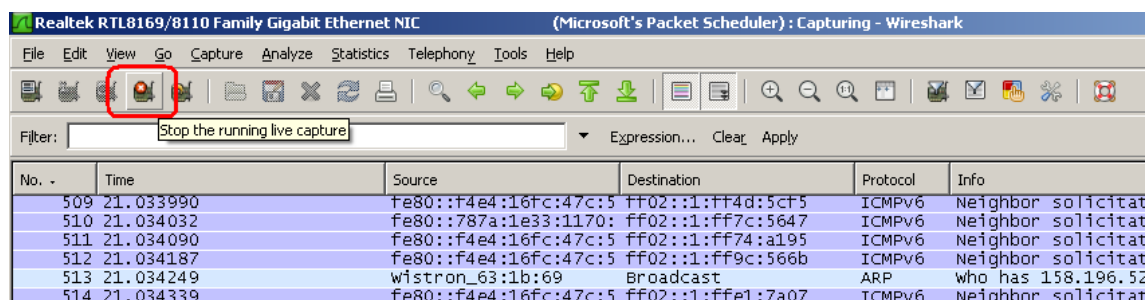
C.6 Provedení a zachycení hovoru

Nyní, pokud máte zapnuté zachytávání veškerého provozu v programu Wireshark v systému Windows a zapnutý a zaregistrovaný účet v programu X-Lite, můžete vykonat hovor pomocí programu SPITFILE. Po chvíli, po stisknutí tlačítka **SEND**, by měl začít vyzvánět softwarový klient X-Lite v prostředí Windows. Zde je zapnuta funkce AA (Auto-answer), takže se hovor vyzvedne automaticky. Vyčkáte nastavených **10 sekund** (pole Advert. Message Duration programu SPITFILE) a hovor se sám ukončí. Po ukončení hovoru můžete zastavit zachytávání provozu v programu Wireshark kliknutím na tlačítko **Stop the running live capture** (viz Obrázek č. 26).

C.7 Vyhodnocení zachyceného RTP streamu, uložení zvukového vzorku a převedení na formát wav

Po zachycení příchozího hovoru je potřeba vybrat ze všech ostatních čistý RTP stream. K tomuto účelu použijeme filtru. Do kolonky **Filter** zkopírujte nebo opište následující řetězec a potvrďte tlačítkem **Apply**:

```
rtp && ip.dst == "X" && rtp.timestamp >= 0 && rtp.timestamp <= 64640
```



Obrázek 30: Zastavení zachytávání provozu v programu Wireshark.

V položce `ip.dst == "X"` musí být za X dosazena IP adresa rozhraní (síťové karty) v systému Windows! Nyní se v hlavním okně programu nachází pouze námi požadovaný RTP stream obsahující data samotného hovoru.

Uložení RTP streamu do souboru zvukového formátu se provede následovně: **Telephony** → **RTP** → **Stream analysis** → **Save payload**. Výsledky ukládejte na Plochu do adresáře **Výsledky_NEMAZAT** ve tvaru **login_1.au**, **login_2.au**, **login_3.au** – **POZOR: zadejte do názvu i příponu .au**. Jako formát uloženého souboru zvolte výhradně **.au** a kanál pouze **forward** (viz Obrázek č. 27). Okno poté zavřete tlačítkem **Close**.

Jelikož software pro finální vyhodnocení kvality umí pracovat pouze se soubory ve formátu *wav* a Wireshark, umí uložit zvukové vzorky pouze ve formátu *raw* nebo *au*. Je tedy nutné převést náš vzorek do požadovaného formátu. K tomuto účelu nám poslouží program SoX (obdoba z Linuxu). Zapneme znovu program Příkazový řádek systému Windows a pomocí následujících příkazů převedeme zvukový soubor ve formátu *au* na formát *wav*:

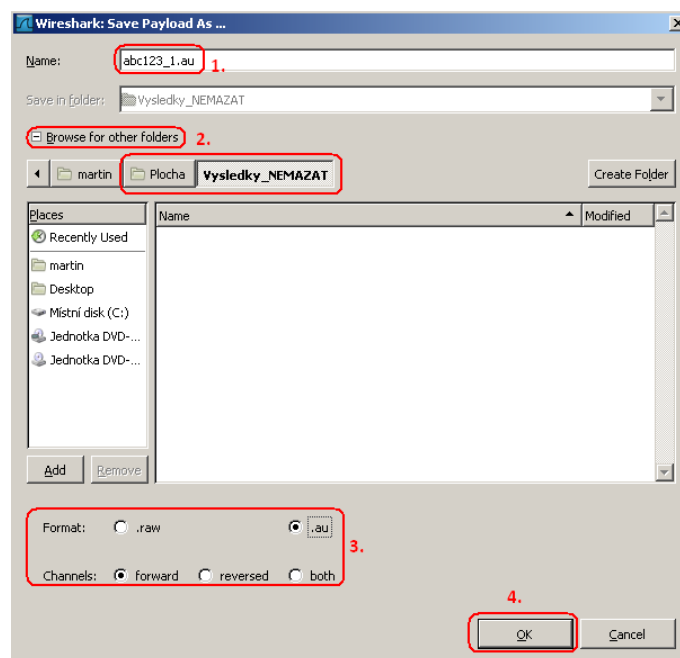
```
C:\> cd Sox
C:\Sox> sox.exe INPUT.AU OUTPUT.WAV
```

INPUT.AU – vámi uložený soubor z aplikace Wireshark.
OUTPUT.WAV – výstupní soubor s příponou *wav*.

C.8 AQuA, vyhodnocení kvality zvukového vzorku

Nyní lze přistoupit k finálnímu kroku, kterým je samotné vyhodnocení kvality. Měření je prováděno aplikací AQuA od finské firmy Sevana. Tento software využívá metodu PESQ k vyhodnocení kvality (degradace) zvukového vzorku vůči vzorku referenčnímu. Ke spuštění programu bude opět využit program Příkazový řádek z prostředí Windows. Porovnání souborů se provede následovně:

```
C:\> AQuA.exe -mode files -src file orig.wav -tstf TESTOVANÝ -acr auto -ratem %mp
```



Obrázek 31: Postup uložení RTP streamu jako zvukový vzorek v aplikaci Wireshark.

orig.wav – referenční zvukový soubor uložený na disku C:.

TESTOVANÝ – název a umístění vytvořeného souboru v kroku 7)

Zapíšte si hodnoty jak procentuálního vyjádření kvality, tak PESQ i MOS hodnotu - budete je uvádět v protokolu.

Měření opakujte 6x! Tzn. přejděte znovu k bodu č. 5) a pokračujte až do konce. Takto získáte ke každému měření 3 hodnoty, celkově tedy 30 hodnot. V hodnocení protokolu bude kladen důraz na **úplnost, kvalitu zpracování a včasné odevzdání**. Ve všech skupinách **NEEXISTUJE** stejné zadání, takže se nesnažte podvádět. Přijdeme na to a v tomto případě bude protokol hodnocen 0b!

Protokol bude obsahovat:

- hlavičku – jména a loginy,
- zadání (ve zkratce, nemusí být rozsáhlé),
- vstupní parametry (IP adresy pracoviště a ve virtuálním stroji, kodek, ztrátovost, ...),
- popis měření,
- schéma zapojení pracoviště,
- použité přístroje, zařízení a software,

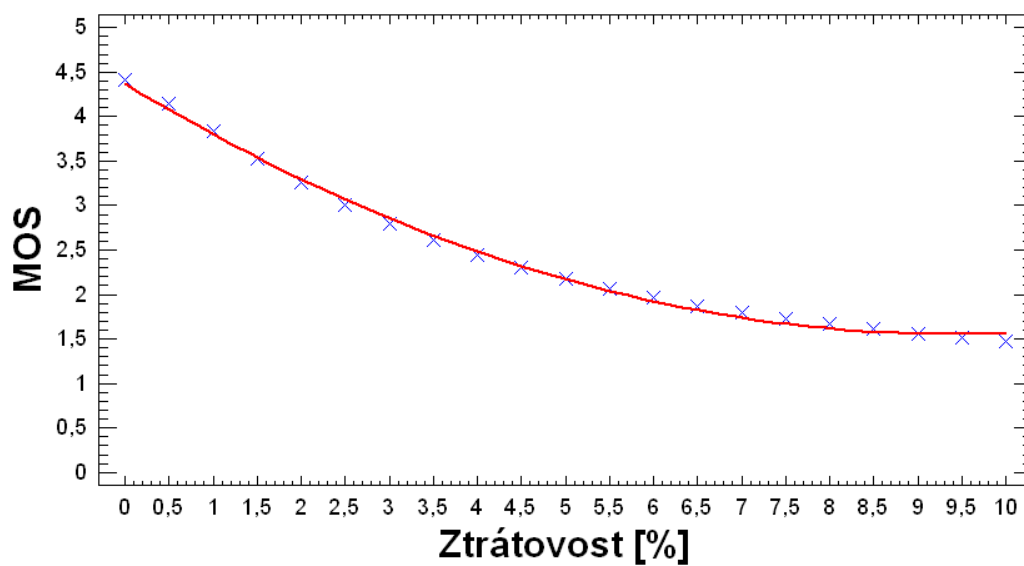
- naměřená data,
- grafické výstupy,
- zhodnocení – závěr.

D Naměřené výsledky a jejich grafické reprezentace

Naměřené a nasimulované výsledky včetně grafických zpracování pro kodeky G.711 μ -law, G.711 A-law, G.723.1 a G.726 (uvedeno na dalších stranách).

Ztrátovost [%]	MOS
0	4,41
0,5	4,14
1	3,83
1,5	3,53
2	3,26
2,5	3,01
3	2,79
3,5	2,61
4	2,44
4,5	2,30
5	2,17
5,5	2,06
6	1,96
6,5	1,87
7	1,80
7,5	1,73
8	1,67
8,5	1,61
9	1,56
9,5	1,52
10	1,48

Tabulka 11: Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.711.



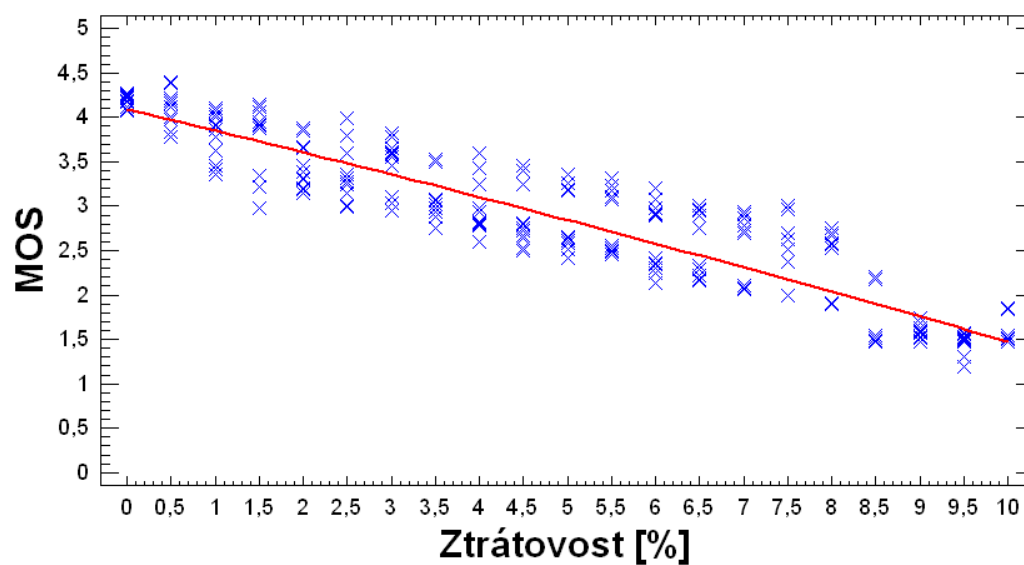
Obrázek 32: Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.711.

Ztrátovost [%]	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS
0	4,25	4,21	4,12	4,27	4,09	4,23	4,17	4,08	4,26	4,12	4,22	4,19					
0,5	4,01	4,40	4,19	4,21	3,98	4,38	4,16	4,16	3,84	3,78	3,98	4,12					
1	3,92	3,87	3,46	3,42	4,03	4,08	3,62	3,90	3,78	3,36	4,10	4,00					
1,5	3,95	3,34	4,06	3,88	3,90	4,12	3,92	3,22	2,98	4,15	3,91	3,90					
2	3,45	3,39	3,88	3,19	3,15	3,21	3,66	3,30	3,85	3,67	3,39	3,32					
2,5	3,99	3,25	3,31	3,28	3,28	3,60	3,79	3,01	3,25	2,99	3,14	3,36					
3	3,10	3,65	3,60	3,78	3,55	3,82	2,95	3,61	3,04	3,56	3,58	3,45					
3,5	2,76	2,98	2,94	3,06	3,50	3,02	2,98	2,76	2,88	3,08	3,53	2,75					
4	2,79	3,25	3,43	2,78	2,94	2,98	2,60	3,60	3,60	2,83	2,81	2,80					
4,5	3,45	2,72	2,67	2,75	2,80	3,25	3,40	2,81	2,50	2,53	2,64	3,24					
5	3,36	2,66	2,64	3,17	2,58	2,51	3,19	2,59	2,41	3,26	2,61	2,65					
5,5	3,08	3,08	3,18	2,50	2,46	2,49	3,10	3,23	3,31	2,46	2,56	2,53					
6	2,30	2,25	3,07	2,92	2,89	2,41	2,14	2,36	3,21	2,98	2,91	2,35					
6,5	2,95	2,97	2,89	2,17	2,16	2,16	2,76	3,00	2,95	2,29	2,22	2,33					
7	2,11	2,91	2,69	2,72	2,10	2,07	2,11	2,93	2,78	2,87	2,10	2,08					
7,5	3,01	2,51	2,62	1,99	1,99	1,99	2,96	2,37	2,69	1,99	2,00	1,99					
8	1,89	1,89	2,59	2,75	1,91	2,57	1,89	1,89	2,53	2,69	1,91	2,67					
8,5	2,20	1,48	1,49	1,48	1,48	1,54	2,17	1,48	1,48	1,48	1,48	1,51					
9	1,60	1,53	1,58	1,74	1,48	1,52	1,57	1,48	1,63	1,68	1,48	1,51					
9,5	1,50	1,19	1,56	1,57	1,48	1,51	1,49	1,31	1,53	1,56	1,48	1,49					
10	1,86	1,55	1,48	1,48	1,86	1,51	1,84	1,48	1,48	1,48	1,85	1,50					

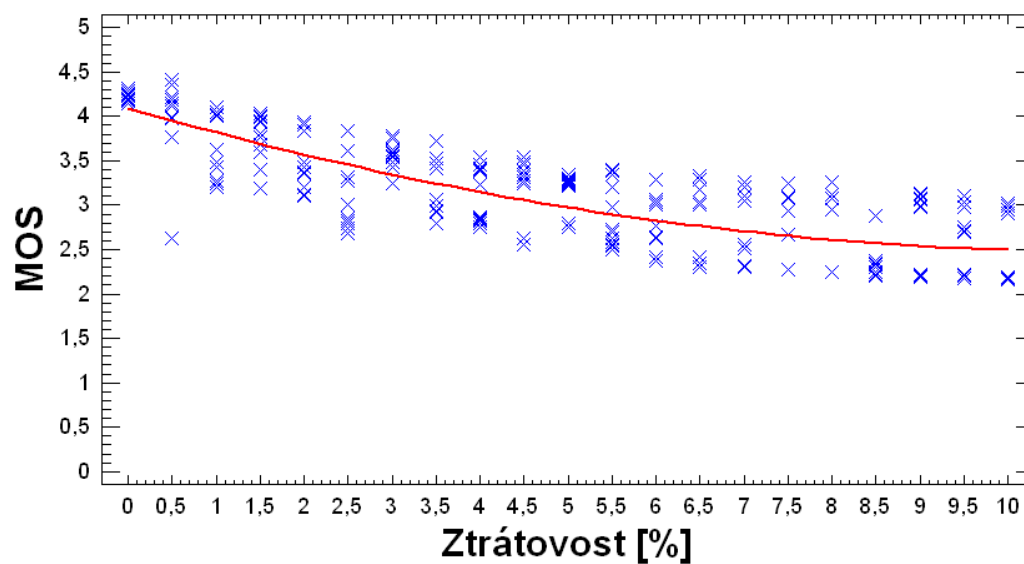
Tabulka 12: Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.711 μ -law.

Ztrátovost [%]	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS
0	4,25	4,28	4,19	4,20	4,31	4,17	4,18	4,23	4,25	4,26	4,15	4,32
0,5	3,99	4,35	4,19	3,97	4,14	3,77	4,12	4,22	4,41	3,99	3,98	2,62
1	4,10	3,43	4,05	3,28	3,20	4,02	4,01	3,62	4,00	3,49	3,24	4,10
1,5	3,77	4,03	3,19	3,81	3,95	3,93	3,59	3,68	3,40	3,99	4,01	3,95
2	3,90	3,94	3,84	3,37	3,36	3,12	3,11	3,36	3,37	3,43	3,20	3,48
2,5	2,80	2,68	2,85	3,61	3,84	3,32	2,82	2,74	2,85	3,32	3,01	3,27
3	3,60	3,43	3,24	3,63	3,78	3,78	3,58	3,75	3,49	3,78	3,55	3,54
3,5	2,92	3,42	3,72	2,99	2,93	2,92	2,80	3,52	3,47	2,94	2,99	3,06
4	3,40	3,23	3,42	2,79	2,75	2,87	3,54	3,38	3,46	2,83	2,84	2,85
4,5	3,54	3,25	3,31	2,55	3,25	3,46	3,32	3,28	3,38	2,62	3,48	3,35
5	3,22	3,22	3,26	3,29	3,27	2,75	3,23	3,25	3,27	3,34	3,30	2,80
5,5	3,20	3,40	2,54	2,50	2,63	2,72	3,34	3,38	2,58	2,98	2,56	2,69
6	3,01	2,38	2,41	2,77	3,00	2,62	3,29	2,38	2,38	3,03	3,06	2,64
6,5	3,00	2,34	2,41	2,34	3,18	3,29	3,03	2,35	2,30	2,34	3,03	3,33
7	2,30	2,31	2,31	3,11	2,51	3,26	2,31	2,32	2,31	3,05	2,55	3,21
7,5	2,67	3,08	2,27	2,27	2,27	3,07	2,93	3,25	2,27	2,27	2,27	3,09
8	3,08	2,25	2,95	3,08	2,25	2,95	3,26	2,24	3,12	3,26	2,24	3,12
8,5	2,22	2,88	2,21	2,31	2,38	2,24	2,21	2,88	2,21	2,38	2,34	2,33
9	2,98	2,22	2,20	2,20	3,07	3,06	3,13	2,20	2,19	2,19	2,99	3,12
9,5	2,18	2,18	2,22	2,69	2,71	3,10	2,18	2,18	2,21	2,98	2,75	3,04
10	2,19	2,99	2,95	2,16	2,16	2,18	2,18	2,91	3,02	2,16	2,16	2,19

Tabulka 13: Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.711. A-law



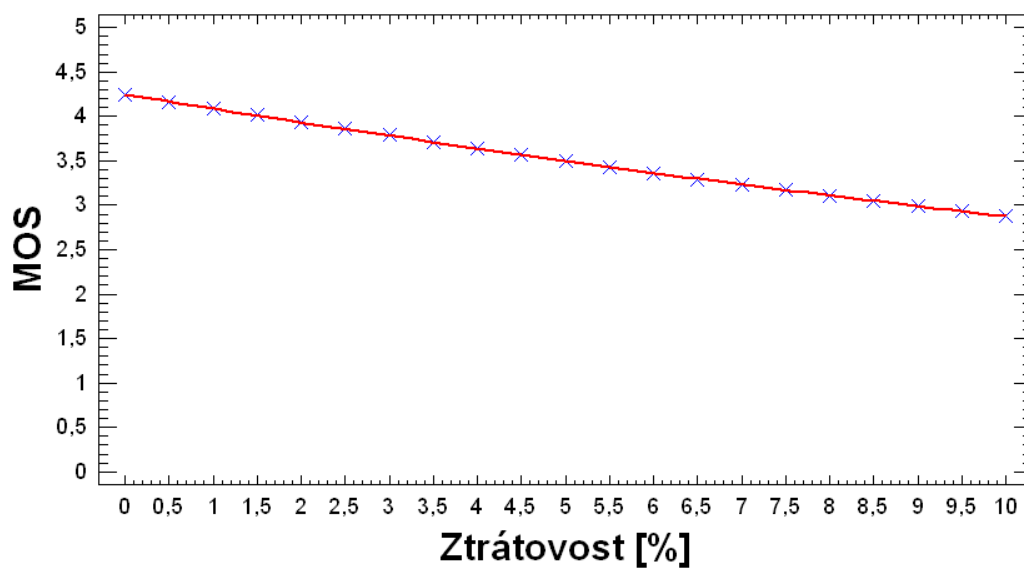
Obrázek 33: Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.711 μ -law.



Obrázek 34: Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.711 A-law.

Ztrátovost [%]	MOS
0	4,24
0,5	4,16
1	4,09
1,5	4,02
2	3,94
2,5	3,86
3	3,79
3,5	3,71
4	3,64
4,5	3,57
5	3,50
5,5	3,43
6	3,36
6,5	3,29
7	3,23
7,5	3,17
8	3,11
8,5	3,05
9	2,99
9,5	2,94
10	2,88

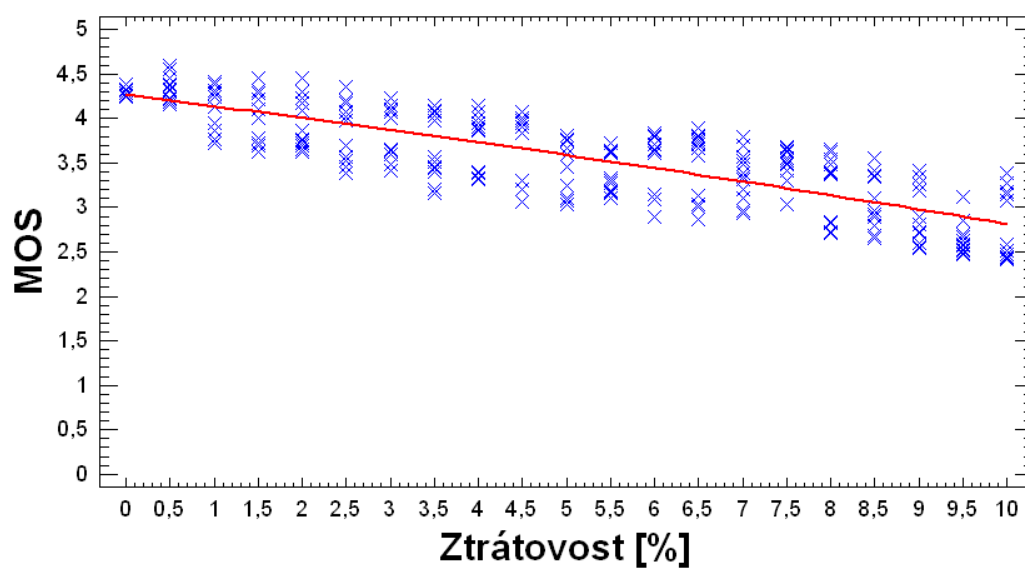
Tabulka 14: Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.726.



Obrázek 35: Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.726.

Ztrátovost [%]	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS
0	4,29	4,31	4,28	4,26	4,25	4,32	4,31	4,28	4,32	4,24	4,38	4,33					
0,5	4,38	4,37	4,59	4,21	4,39	4,45	4,16	4,23	4,32	4,19	4,56	4,33					
1	4,32	4,29	4,25	3,77	4,29	4,13	4,39	4,32	3,87	3,72	4,41	3,95					
1,5	3,70	4,01	4,28	4,28	3,63	4,46	3,78	4,10	4,45	4,31	3,72	4,21					
2	3,72	3,87	4,45	3,70	4,18	3,75	3,62	4,09	4,23	3,76	4,30	3,66					
2,5	3,57	3,46	4,02	4,17	3,39	4,08	3,70	3,52	3,97	4,35	3,45	4,20					
3	4,23	4,14	3,59	3,60	3,42	4,10	4,01	4,07	3,64	3,66	3,48	4,01					
3,5	3,97	3,57	3,40	3,45	4,09	3,16	4,03	4,14	3,44	3,51	4,08	3,20					
4	4,15	4,01	3,31	3,95	3,33	3,88	3,95	4,08	3,40	3,90	3,39	3,87					
4,5	3,21	4,01	3,90	3,06	3,95	3,83	3,30	3,91	3,83	3,06	4,07	3,97					
5	3,76	3,10	3,76	3,75	3,45	3,03	3,67	3,24	3,81	3,76	3,60	3,07					
5,5	3,72	3,17	3,19	3,63	3,11	3,16	3,64	3,30	3,28	3,61	3,33	3,11					
6	3,61	2,89	3,66	3,64	3,09	3,79	3,81	2,89	3,71	3,79	3,14	3,84					
6,5	3,77	3,80	3,01	3,58	3,74	2,87	3,89	3,81	3,03	3,71	3,67	3,13					
7	3,79	2,96	3,32	3,53	3,11	3,57	3,48	2,94	3,39	3,34	3,21	3,70					
7,5	3,64	3,49	3,52	3,04	3,41	3,62	3,68	3,50	3,55	3,30	3,62	3,67					
8	3,54	2,71	3,39	3,48	2,84	3,40	3,66	2,73	3,37	3,63	2,82	3,49					
8,5	3,55	2,65	2,90	2,92	3,34	2,79	3,56	2,68	3,36	3,10	3,42	2,96					
9	3,34	3,19	2,54	2,72	2,73	2,60	3,42	3,26	2,55	2,89	2,81	2,71					
9,5	2,63	2,85	2,48	2,51	2,49	2,47	2,70	3,12	2,53	2,58	2,57	2,67					
10	3,27	2,47	3,17	2,41	3,14	2,58	3,39	2,51	3,08	2,44	3,15	2,43					

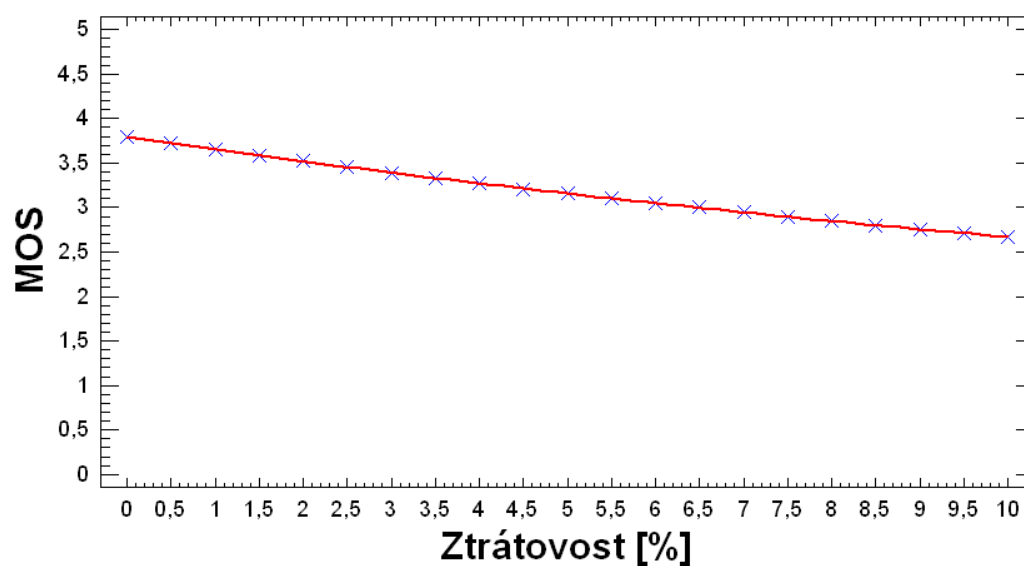
Tabulka 15: Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.726.



Obrázek 36: Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.726.

Ztrátovost [%]	MOS
0	3,79
0,5	3,72
1	3,65
1,5	3,58
2	3,52
2,5	3,46
3	3,39
3,5	3,33
4	3,27
4,5	3,21
5	3,16
5,5	3,10
6	3,05
6,5	3,00
7	2,95
7,5	2,90
8	2,85
8,5	2,80
9	2,76
9,5	2,71
10	2,67

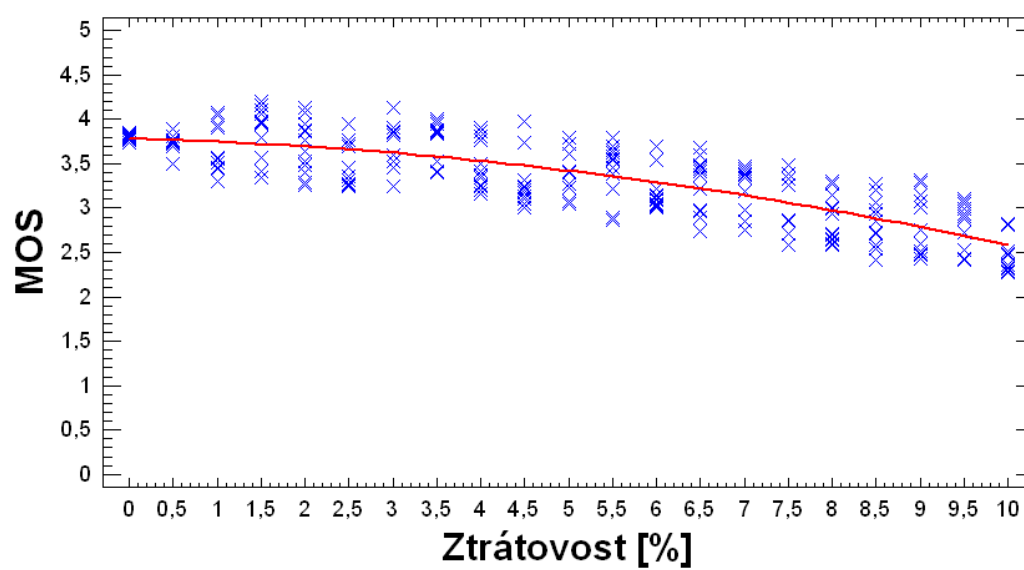
Tabulka 16: Nasimulované výsledky užitím E-modelu pro kodek G.723.1.



Obrázek 37: Grafické zpracování výsledků simulovaných užitím E-Modelu pro kodek G.723.1.

Ztrátovost [%]	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS	MOS
0	3,81	3,82	3,76	3,74	3,83	3,85	3,79	3,78	3,76	3,80	3,82	3,82
0,5	3,73	3,74	3,69	3,50	3,69	3,73	3,74	3,72	3,77	3,81	3,89	3,75
1	3,48	3,94	3,45	4,07	3,51	3,51	3,19	4,04	3,30	3,94	3,90	3,44
1,5	4,06	3,42	3,85	3,87	3,57	3,79	3,84	3,35	3,85	3,77	3,79	3,99
2	3,64	3,77	3,13	3,04	3,82	3,40	3,88	3,72	3,16	3,53	3,71	3,87
2,5	3,22	3,70	3,10	3,46	3,95	3,09	3,16	3,73	3,14	3,77	3,73	3,11
3	3,70	3,64	3,45	3,60	3,60	3,82	3,69	3,73	3,25	3,52	3,52	3,69
3,5	3,69	3,41	3,66	3,65	3,68	3,40	3,70	3,54	3,83	3,80	3,67	3,53
4	3,16	2,91	3,21	3,48	3,58	3,24	3,37	3,08	3,42	3,67	3,62	3,50
4,5	3,47	3,17	2,91	3,00	3,05	2,95	3,39	3,21	2,93	3,00	3,24	3,04
5	3,35	3,05	3,41	3,07	3,61	3,28	3,54	3,40	3,37	3,23	3,27	3,42
5,5	3,54	3,39	3,22	3,43	3,46	2,71	3,33	3,51	3,38	3,46	3,37	2,67
6	3,10	3,26	2,86	2,84	2,87	3,22	3,13	3,37	2,64	2,86	2,80	2,85
6,5	3,20	3,22	3,23	2,90	2,97	3,31	3,37	3,41	3,28	2,74	2,98	3,33
7	3,30	3,37	3,12	2,63	3,21	2,85	3,33	3,19	3,39	2,75	3,28	2,75
7,5	2,58	2,59	3,14	3,26	3,33	3,39	3,26	2,87	3,10	3,37	2,85	3,14
8	2,54	3,30	2,50	3,01	2,99	2,61	2,51	2,93	2,56	3,28	3,15	2,61
8,5	3,15	2,41	2,98	2,94	2,85	2,71	3,21	2,38	2,59	3,06	2,54	2,58
9	2,98	2,49	2,40	3,29	3,12	2,49	3,06	2,57	2,45	3,26	3,11	2,75
9,5	3,10	2,72	3,00	2,89	3,06	2,44	2,91	2,53	3,09	2,95	3,08	2,43
10	2,32	2,47	2,32	2,48	2,51	2,38	2,41	2,32	2,35	2,82	2,81	2,36

Tabuľka 17: Naměřené výsledky metodou PESQ pro kodek G.723.1.



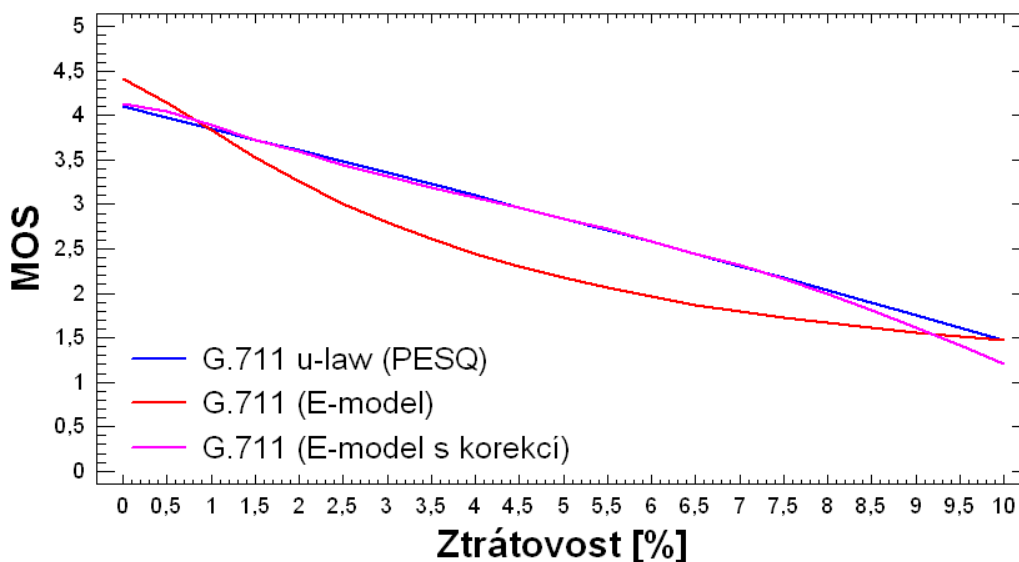
Obrázek 38: Grafické zpracování výsledků naměřených metodou PESQ pro kodek G.723.1.

E Naměřené hodnoty s provedenou korekcí

Přehled hodnot získaných metodou PESQ, simulováním pomocí E-modelu a hodnot, na něž byla použita navržená korekční funkce včetně jejich grafického zpracování pro kodeky G.711 μ -law, G.711 A-law, G.723.1 a G.726 (uvedeno na dalších stranách).

Ztrátovost [%]	PESQ [MOS]	E-model [MOS]	E-model s kor. [MOS]	Dif.
0	4,10	4,41	4,13	-0,03
0,5	3,98	4,14	4,04	-0,06
1	3,85	3,83	3,89	-0,04
1,5	3,73	3,53	3,73	0,00
2	3,61	3,26	3,59	0,02
2,5	3,48	3,01	3,44	0,04
3	3,36	2,79	3,31	0,05
3,5	3,23	2,61	3,19	0,04
4	3,10	2,44	3,07	0,03
4,5	2,97	2,30	2,96	0,01
5	2,84	2,17	2,84	0,00
5,5	2,71	2,06	2,72	-0,01
6	2,58	1,96	2,59	-0,01
6,5	2,45	1,87	2,45	0,00
7	2,31	1,80	2,32	-0,01
7,5	2,17	1,73	2,16	0,01
8	2,04	1,67	2,00	0,04
8,5	1,90	1,61	1,81	0,09
9	1,76	1,56	1,62	0,14
9,5	1,62	1,52	1,42	0,20
10	1,48	1,48	1,20	0,28

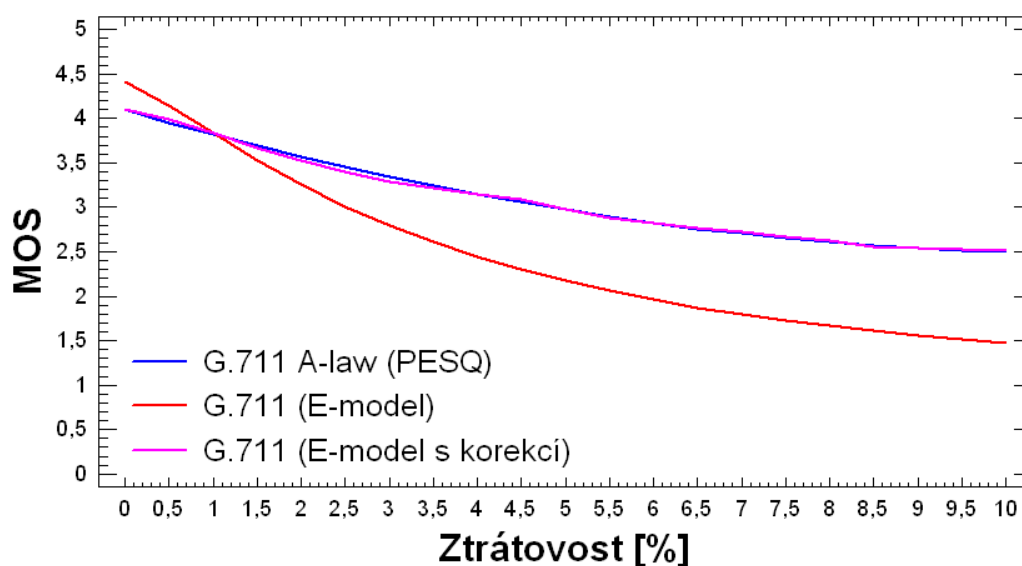
Tabulka 18: Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 μ -law.



Obrázek 39: Porovnání křivek získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 μ -law.

Ztrátovost [%]	PESQ [MOS]	E-model [MOS]	E-model s kor. [MOS]	Dif.
0	4,10	4,41	4,10	0,00
0,5	3,95	4,14	3,99	-0,04
1	3,82	3,83	3,83	-0,01
1,5	3,69	3,53	3,67	0,02
2	3,57	3,26	3,53	0,04
2,5	3,46	3,01	3,40	0,06
3	3,35	2,79	3,29	0,06
3,5	3,24	2,61	3,22	0,02
4	3,15	2,44	3,14	0,01
4,5	3,06	2,30	3,09	-0,03
5	2,98	2,17	2,98	0,00
5,5	2,90	2,06	2,88	0,02
6	2,83	1,96	2,82	0,01
6,5	2,76	1,87	2,77	-0,01
7	2,71	1,80	2,72	-0,01
7,5	2,66	1,73	2,67	-0,01
8	2,61	1,67	2,62	-0,01
8,5	2,57	1,61	2,56	0,01
9	2,54	1,56	2,54	0,00
9,5	2,52	1,52	2,53	-0,01
10	2,50	1,48	2,52	-0,02

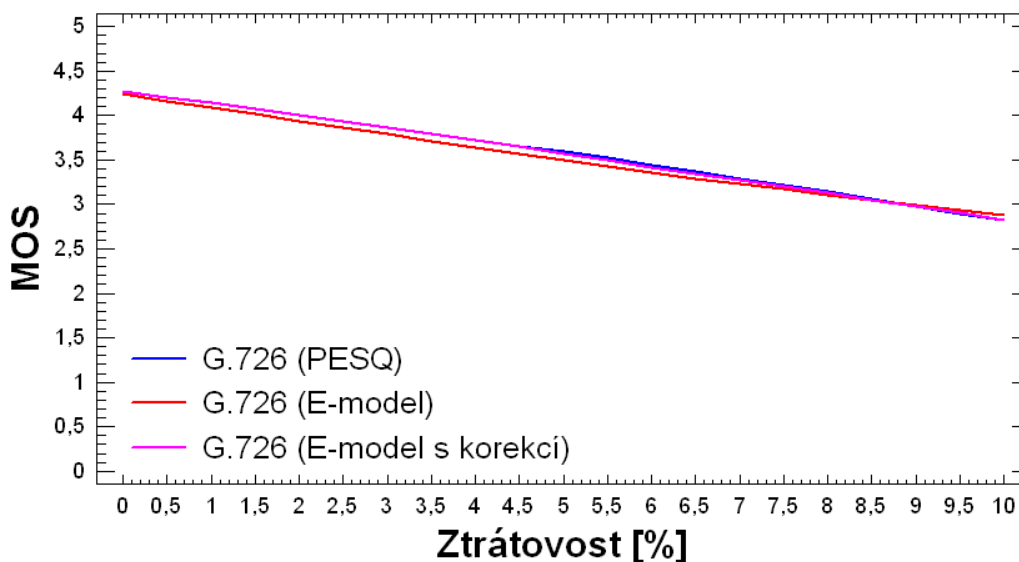
Tabulka 19: Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 A-law.



Obrázek 40: Porovnání křivek získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.711 A-law.

Ztrátovost [%]	PESQ [MOS]	E-model [MOS]	E-model s kor. [MOS]	Dif.
0	4,27	4,24	4,27	0,00
0,5	4,20	4,16	4,20	0,00
1	4,14	4,09	4,14	0,00
1,5	4,07	4,02	4,08	-0,01
2	4,01	3,94	4,01	0,00
2,5	3,94	3,86	3,93	0,01
3	3,87	3,79	3,87	0,00
3,5	3,80	3,71	3,79	0,01
4	3,73	3,64	3,72	0,01
4,5	3,66	3,57	3,65	0,01
5	3,59	3,50	3,57	0,02
5,5	3,52	3,43	3,50	0,02
6	3,44	3,36	3,42	0,02
6,5	3,37	3,29	3,34	0,03
7	3,29	3,23	3,27	0,02
7,5	3,22	3,17	3,20	0,02
8	3,14	3,11	3,13	0,01
8,5	3,06	3,05	3,05	0,01
9	2,98	2,99	2,98	0,00
9,5	2,90	2,94	2,91	-0,01
10	2,82	2,88	2,83	-0,01

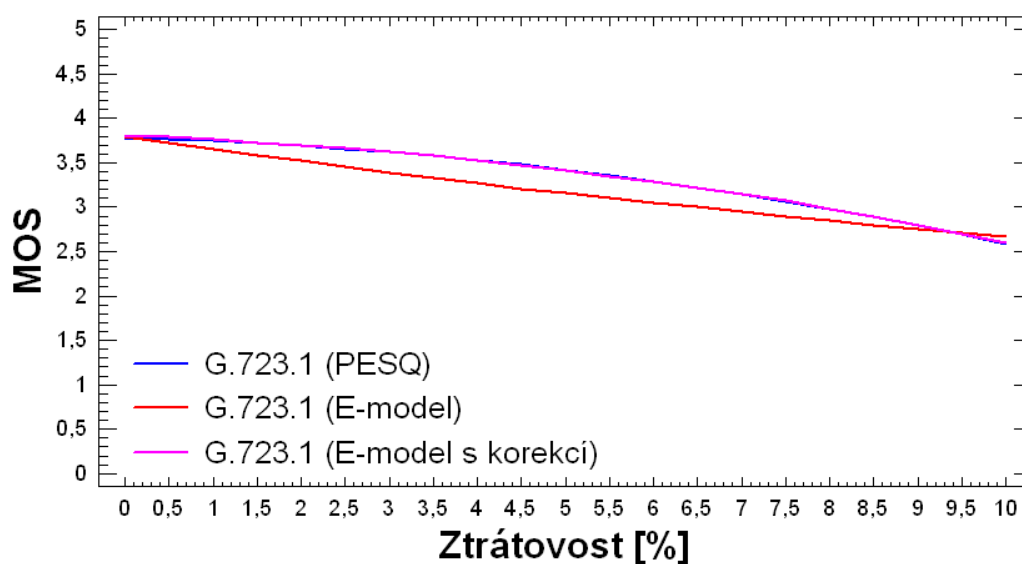
Tabulka 20: Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.726.



Obrázek 41: Porovnání křivek získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.726.

Ztrátovost [%]	PESQ [MOS]	E-model [MOS]	E-model s kor. [MOS]	Dif.
0	3,78	3,79	3,81	-0,03
0,5	3,77	3,72	3,79	-0,02
1	3,75	3,65	3,76	-0,01
1,5	3,72	3,58	3,73	-0,01
2	3,69	3,52	3,70	-0,01
2,5	3,66	3,46	3,67	-0,01
3	3,62	3,39	3,62	0,00
3,5	3,58	3,33	3,58	0,00
4	3,53	3,27	3,53	0,00
4,5	3,48	3,21	3,47	0,01
5	3,42	3,16	3,42	0,00
5,5	3,36	3,10	3,35	0,01
6	3,29	3,05	3,29	0,00
6,5	3,22	3,00	3,22	0,00
7	3,14	2,95	3,15	-0,01
7,5	3,06	2,90	3,07	-0,01
8	2,98	2,85	2,98	0,00
8,5	2,89	2,80	2,89	0,00
9	2,79	2,76	2,80	-0,01
9,5	2,69	2,71	2,70	-0,01
10	2,58	2,67	2,60	-0,02

Tabulka 21: Přehled hodnot získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.723.1.



Obrázek 42: Porovnání křivek získaných měření metodou PESQ, simulací E-modelem a korekcí hodnot získaných E-modelem pro kodek G.723.1.